



ISEL

INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA

Departamento de Engenharia Mecânica



Simulação Térmica de uma Fachada de Dupla Pele com Ventilação Natural

PEDRO MIGUEL DUARTE PEIXEIRO

(Licenciado em Engenharia Mecânica)

Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica

Orientadores:

Doutor Fernando Marques da Silva
Doutora Isabel Simões de Carvalho

Júri:

Presidente: Doutor João Manuel Ferreira Calado

Vogais:

Doutor Armando Teófilo dos Santos Pinto
Engenheiro Francisco Manuel Fernandes Severo
Doutora Isabel Simões de Carvalho
Doutor Fernando Marques da Silva

Novembro de 2009

Resumo

Este trabalho relata os resultados obtidos de uma simulação térmica de uma fachada de dupla pele com ventilação natural utilizando um software genérico de simulação térmica de edifícios. Esta fachada encontra-se montada numa célula de teste no Laboratório de Engenharia Civil em Lisboa, e cujo propósito é verificar e analisar o comportamento térmico deste tipo de elementos em regimes de ventilação natural. Para atingir o objectivo desta dissertação em simular a DSF, é utilizado o amplamente conhecido *EnergyPlus*, um programa de grande capacidade para simular o comportamento térmico de edifícios e dimensionar pormenorizadamente os seus sistemas de ventilação e AVAC. Paralelamente a este software, é utilizado um outro programa, o *DesignBuilder*, tratando-se este de um interface comercial para o *EnergyPlus*. Os resultados das simulações efectuadas são comparadas com os dados experimentais retirados durante o funcionamento da DSF entre das datas de 23 a 28 de Abril de 2008.

Utilizando estas ferramentas informáticas, foram efectuadas duas modelações da fachada de modo a avaliar diferentes graus de detalhe, ambas segundo as características geométricas, propriedades térmicas e ópticas dos seus elementos de construção, sombreamento existente e modo de funcionamento durante o período em causa. Posteriormente são comparados os resultados das simulações com os dados experimentais.

A análise dos resultados permitiu chegar á conclusão que, embora o software utilizado não contenha até á data um modelo próprio e detalhado para fachadas envidraçadas de dupla pele com ventilação natural, este possui uma potencialidade promissora para efectuar uma simulação fiável. No entanto, diversas divergências significativas foram notadas e analisadas nos parâmetros comparados, nomeadamente a temperatura e o caudal, de modo a estabelecer algumas limitações do software.

Palavras chave: Fachadas de Dupla Pele; Ventilação Natural; Simulação Térmica de Edifícios.

Abstract

The present work analyses and evaluates the results obtained from a simulation of a naturally ventilated double skin façade, using a building energy simulation software. This façade is currently installed in the Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), Lisbon, with the purpose of verifying and analyze the thermal behavior of these kinds of constructive elements while using naturally ventilated flows. In order to reach the goals proposed in this dissertation, it is used the software *EnergyPlus*, a commonly known program used to assess the thermal behavior of buildings, as well as to define his ventilation and HVAC systems. Parallel to this software, it is used another tool as an interface to *EnergyPlus*, named *DesignBuilder*. The results of the simulations are compared to the experimental data obtained from the façade during the period of 23 to 28 of April of 2008.

Using these tools, two modulations of the façade were created in order to evaluate different degrees of details, both using the geometrical characteristics, thermal and optical properties of all constructive elements, existing shading and the functional mode during the period where the façade was experimented. Afterwards, comparisons are established between the simulation results and the experimental data obtained.

The final results point out for the potentiality of the software to correctly simulate the behavior of the double skin façade, though this tool does not possess an internal model specifically for these kinds of building constructive elements. Even so, several differences between the experimental data and the results from the simulations were pointed out and analyzed in order to establish the limitations of the software.

Key words: Double Skin Façades; Natural Ventilation; Building Thermal Simulation.

Agradecimentos

Agradeço ao meu orientador Doutor Fernando Marques da Silva e co-orientadora Doutora Isabel Simões de Carvalho pelo apoio, paciência e tempo dispendido, sem os quais não seria possível elaborar e desenvolver o presente trabalho.

Ao Laboratório Nacional de Engenharia Civil pela disponibilização das instalações e do tema aos alunos do curso de Engenharia Mecânica do Instituto Superior de Engenharia de Lisboa.

Uma palavra de agradecimento também para o Engenheiro Tiago Duarte, colega e amigo, pelas muitas horas dispendidas a discutir assuntos sobre os temas abordados neste trabalho, como também outros que nada tiveram a ver para aliviar dos momentos mais complicados.

Para a minha família e amigos próximos, a quem agradeço profundamente os diversos apoios recebidos, e a quem dedico este trabalho.

Índice

1. Introdução	1
1.1. História e Evolução	2
1.2. Contribuição da Tese	4
1.3. Organização da Tese.....	5
2. Fundamentos Teóricos	6
2.1. Classificação de DSF's	8
2.1.1. Tipo de Ventilação	8
2.1.2. Configuração da Fachada	10
2.1.3. Tipo de Fluxo	14
2.2. Fundamentos de Transferência de Calor	15
2.2.1. Condução.....	16
2.2.2. Convecção	19
2.2.3. Radiação	24
2.2.4. Transferência Global de Energia.....	27
2.3. Princípios de Funcionamento	29
2.4. Vantagens e Desvantagens	31
3. Ferramentas Numéricas e Modelação	36
3.1. Softwares: EnergyPlus e DesignBuilder.....	38
3.2. Descrição Geral da Instalação	42
3.3. Criação do Modelo da DSF	43
4. Simulações e Resultados	50
4.1. Condições Externas	50
4.1.1. Temperatura Seca e Humidade Relativa	52
4.1.2. Radiação Solar.....	53
4.1.3. Velocidade e Direcção do Vento.....	55
4.2. Algoritmos de Convecção	57
4.2.1. Convecção Externa.....	57
4.2.2. Convecção Interna.....	62
4.3. Modelo Airflow Network	64
4.4. Resultados de Simulação	68
5. Conclusões	79
5.1. Melhorias e Perspectivas Futuras	81

ANEXO.....	82
A1. Envidraçados.....	83
A2. Sombreamento	84
A3. Caixilharia.....	87
A4. Grelhas de Passagem de Ar	89
A5. Paredes Externas	90
A6. Cobertura	91
A7. Pavimento	92
Referências Bibliográficas	94

Índice de Figuras

Figura 1 – Exemplos de aplicações de fachadas de dupla pele	1
Figura 2 – Exemplos históricos de aplicações de fachadas de dupla pele: Steiff, Alemanha – a); Post Office Savings Bank, Viena – b).	3
Figura 3 – Comparação entre uma fachada simples (a) e uma fachada de dupla pele (b)	6
Figura 4 – Curva de temperatura ao longo da secção vertical de uma DSF.....	7
Figura 5 – Tipos de Ventilação: Ventilação Natural - a); e Ventilação Mecânica - b). Legenda: Superfície exterior - 1); Superfície interior - 2); Canal interno - 3); Sombreamento - 4); Aberturas de ventilação - 5); Condução de retorno de ar - 6).....	9
Figura 6 – Tampão	10
Figura 7 – Parede Climatizada	11
Figura 8 – Configuração Modular: Vista frontal - a); Secção transversal – b); Vista em planta – c).....	12
Figura 9 – Coluna de Extracção: Vista frontal - a); Secção transversal – b); Vista em planta – c).....	12
Figura 10 – Corredor: Vista frontal - a); Secção transversal – b); Vista em planta – c).....	13
Figura 11 – Multi-piso: Vista frontal - a); Secção transversal – b); Vista em planta – c)	14
Figura 12 – Modos de ventilação: FE - 1); FI - 2); AI - 3); AE - 4); FR - 5).....	15
Figura 13 – Condução Térmica.....	17
Figura 14 – Convecção térmica.....	20
Figura 15 – Convecção Natural: Perfis de velocidade e temperatura numa placa vertical – a); Escoamento do fluído entre um canal formado por duas placas - b)	22
Figura 16 – Perfil de velocidades no interior de uma DSF	22
Figura 17 – Espectro Electromagnético.	26
Figura 18 – Trocas de Calor no canal de uma DSF.....	29
Figura 19 – Funcionamento das fachadas de dupla pele no: Inverno – a); Verão – b).....	33
Figura 20 – Volume de controlo para o balanço energético entre uma superfície e o exterior	40
Figura 21 – Volume de controlo para o balanço energético entre uma superfície e o interior	40
Figura 22 – Interface do <i>DesingBuilder</i>	41
Figura 23 – DSF instalada no LNEC: Vista da fachada no exterior – a); Interior da fachada com vista do exterior do edifício – b).	42
Figura 24 – Zoneamento da Instalação.....	44

Figura 25 – Modelação da DSF.....	45
Figura 26 – Vista em corte da DSF da modelação simplificada.	46
Figura 27 – Divisão da fachada no modelo detalhado: grelhas inferiores – a); envidraçados – b); grelhas superiores – c).	47
Figura 28 – Temperatura seca exterior observada durante o funcionamento da fachada e humidade relativa do ficheiro EPW para o mesmo período.	53
Figura 29 – Radiação directa normal e radiação difusa durante o período de funcionamento da fachada.	54
Figura 30 – Velocidade e direcção do vento durante o período de funcionamento da fachada.	55
Figura 31 – Relação entre o número de renovações por hora com o coeficiente de convecção interna no algoritmo <i>Ceiling Diffuser</i> . Comparação entre a correlação matemática e valores experimentais.....	63
Figura 32 – Perfil de velocidades através de uma abertura vertical no <i>Component Detailed Opening</i>	65
Figura 33 – Abertura no <i>Component Simple Opening</i>	67
Figura 34 – Resultados da simulação da temperatura interna da DSF.	68
Figura 35 – Resultados da simulação do caudal na DSF.	70
Figura 36 – Resultados da simulação do caudal na DSF. Identificação de períodos de maiores divergências.....	72
Figura 37 – Caudal simulado do modelo simplificado e respectiva diferença de temperatura simulada.	76
Figura 38 – Caudal simulado do modelo detalhado e respectiva diferença de temperatura simulada.	76
Figura 39 – Caudal simulado através do <i>Component Simple Opening</i>	78

Anexo

Figura A1 – Esquema do sistema de sombreamento.....	85
Figura A2 – Esquema das aberturas laterais do sombreamento: vista superior – a); vista lateral – b)	85
Figura A3 – Esquema geral da caixilharia dos envidraçados.....	87
Figura A4 – Representações esquemáticas do modo de definição caixilharia da DSF: Dimensões de relevos – a); Dimensões das divisórias – b); Tipo de divisórias – c).	88

Figura A5 – Estratificação da cobertura.....	91
Figura A6 – Estratificação do pavimento.....	92

Índice de Tabelas

Tabela 1 – Coeficientes de pressão do vento para cada grelha (modelo detalhado).	56
Tabela 2 – Coeficientes de pressão do vento para a superfície externa da fachada (modelo simplificado).	56

Anexo

Tabela A1 – Propriedades ópticas dos envidraçados do pano interior e exterior.....	83
Tabela A2 – Propriedades do ar na cavidade interna do pano interior.....	84
Tabela A3 – Propriedades gerais do sombreamento (segundo o fornecedor).....	86
Tabela A4 – Propriedades ópticas do sombreamento (segundo o fornecedor).	86
Tabela A5 – Pormenores da geometria da caixilharia.....	87
Tabela A6 – Propriedades térmicas e ópticas do alumínio da caixilharia da DSF.....	88
Tabela A7 – Propriedades térmicas e ópticas dos elementos constituintes das paredes exteriores.	90
Tabela A8 – Propriedades térmicas e ópticas dos elementos constituintes da cobertura.	92
Tabela A9 – Propriedades Térmicas e ópticas dos elementos constituintes do pavimento.	93

1. Introdução

Presentemente assiste-se a uma nova era de edifícios comerciais na Europa, iniciada por conceitos inovadores que tiveram origem na Alemanha, Reino Unido, e Bélgica (figura 1). Engenheiros e Arquitectos colaboram e trabalham mutuamente com o objectivo em criar uma nova tipologia de edifícios que são energeticamente eficientes, não poluentes do meio ambiente e, de um posto de vista arquitectónico, lustrosos. O elemento comum que lhes confere estas características é a presença de fachadas constituídas por dois panos de envidraçados, formando um canal entre eles, onde se alojam os sistemas de sombreamento e se pode promover a circulação de ar. É esperado que estes elementos possibilitem uma poupança até 30% em consumos energéticos (Arons e Glicksman, 2003), providenciando ventilação natural controlada mesmo em edifícios de elevada altura e uma redução acentuada nos níveis de ruído. Ao mesmo tempo que melhoram o conforto dos ocupantes devido às razões anteriores, permitem também a implementação de uma arquitectura visualmente mais transparente comparativamente a fachadas convencionais.



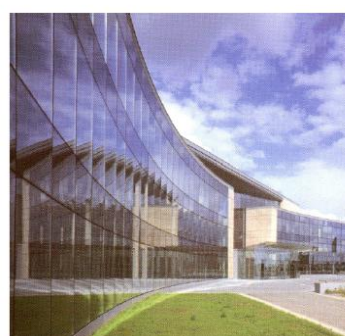
Commerzbank, Frankfurt, Alemanha



Briarcliff House, Farnborough, Reino Unido



Aula Magna, Louvain-la-Neuve, Bélgica



UCB, Bruxelas, Bélgica

Figura 1 - Exemplos de aplicações de fachadas de dupla pele (Saelens, 2002).

À medida que esta tendência é expandida, arquitectos e engenheiros confrontam-se cada vez mais com a necessidade de prever o comportamento desta tecnologia aplicada a edifícios com diversos regimes de ocupação, diferentes configurações e modos de construção e sob climas distintos. É necessário o conhecimento de como avaliar o seu desempenho e compreender a inter-relação dos diferentes parâmetros que influenciam estes sistemas. A dificuldade em atingir estes objectivos prende-se ao facto de este tipo de elementos dinâmicos possuírem um comportamento que não é conforme com os presentes métodos de avaliação ou ferramentas de modelação. Não existem de momento programas de modelação de deste tipo de fachadas nem uma base de informação (estabelecida em dados recolhidos durante monitorizações de edifícios reais ou células de teste, e devidamente consistente) necessários para compreender o complexo comportamento térmico de sistemas de fachadas de dupla pele (Doebber e McClintock, 2006).

A presente tese foi elaborada em parceria com o Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC). O objectivo é comparar a avaliação do comportamento térmico de uma fachada de dupla pele (double skin facade, DSF), montada em espaço pertencente ao LNEC e com dispositivos próprios para recolha de dados, com uma simulação térmica proveniente de uma ferramenta numérica de avaliação do desempenho energético de edifícios. A apreciação da capacidade do software para simular o comportamento desta tecnologia é conseguida comparando as simulações com os resultados experimentais adquiridos durante o funcionamento da célula de teste.

1.1. História e Evolução

Os primeiros conceitos desta tecnologia surgiram em 1876, pelo director do Museu de Bruxelas da altura, Jean-Baptiste Jobard. Jobard descreveu uma primeira versão de uma fachada de dupla pele ventilada mecanicamente. Faz referência de como nas estações frias o ar quente deveria de atravessar o interior da fachada, do mesmo modo que na estação quente deveria de ser ar frio. Só passado 65 anos é que reaparece uma ideia semelhante, por Paul Scheerbaert (Saelens, 2002).

A primeira instalação funcional de uma DSF surge em 1903 nas instalações industriais da Steiff, na Alemanha (figura 2-a). O objectivo desta fachada é otimizar o uso de

iluminação natural ao mesmo tempo que tem em conta o clima frio e fortes ventos da zona. No mesmo ano, Otto Wagner ganha o concurso para construção do Post Office Savings Banks em Viena, Áustria. O edifício, construído em duas fases entre 1904 e 1912, possui uma clarabóia de dupla pele no *hall* principal (figura 2-b).



a



b

Figura 2 – Exemplos históricos de aplicações de fachadas de dupla pele: Steiff, Alemanha – a); Post Office Savings Bank, Viena – b).

A partir de 1920, os objectivos para a construção de fachadas de pele dupla alteram-se. Dois casos são o exemplo de tal mudança: o arquitecto Moisei Ginzburg, russo, criou um projecto para um bloco de habitações utilizando o conceito de fachadas de pele dupla, e um outro arquitecto, Charles Edouard Jeanneret, conhecido por Le Corbusier, desenhava o Centrosoyus em Moscovo, assim como outros dois projectos. Embora estes últimos projectos criados por Jeanneret não possuíssem á altura da sua construção qualquer tipo de DSF, os desenhos arquitectónicos iniciais indicavam fachadas de dupla pele ventiladas a serem instaladas nos edifícios, que acabaram por ser avaliadas como sendo demasiado ineficientes e de elevado custo de implementação (Crespo, 1999).

Desde os finais das décadas de 70, as fachadas de dupla pele têm passado por um crescimento acelerado (em especial a partir da década de 80, com o aumento de implementação de ventilação mecânica no interior das fachadas na Europa (Saelens, 2002)) á medida que a comunidade científica se apercebe de que esta tecnologia permite incorporar fachadas totalmente envidraçadas nos edifícios para melhorias estéticas e iluminação natural sem comprometer o comportamento térmico das mesmas. Com as melhorias em iluminação

natural e maior controlo das cargas térmicas a que as fachadas estão sujeitas, as DSFs começam a ser consideradas como uma tecnologia “verde” pelo público em geral, ao mesmo tempo que promovem uma estética apelativa e sustentável (Doebber e McClintock, 2006).

A partir da década de 90, dois factores passam a estar na origem de uma proliferação do conceito de DSF: o aumento da preocupação do impacto ambiental devido ao consumo energético mundial, bem como a imagem política associada à implementação desta tecnologia como sendo uma mais-valia para o meio ambiente (Crespo, 1999). Aliada á ideia de estética cada vez mais apelativa aos arquitectos, junta-se também a iniciativa de criar condições para que esta tecnologia não esteja somente adaptada a não prejudicar o comportamento térmico do edifício, mas sim possuir um papel mais activo em promover e melhorar o conforto do espaço interior com vista a diminuir os consumos energéticos necessários para arrefecimento, aquecimento e ventilação.

A partir deste ponto e até à actualidade, desenvolvimentos são levados a cabo com vista a conceber fachadas inteligentes (FI). Este conceito baseia-se numa fachada com um comportamento dinâmico, capaz de prever e se adaptar automaticamente às condições internas e externas de modo a garantir um determinado nível de eficiência, mantendo o conforto com o mínimo uso de energia (Wigginton e Harris, 2002). Uma FI deverá de fazer uso de energias renováveis, utilizando medidas eficientes e de baixo consumo energético (ventilação natural, *free-cooling* nocturno, iluminação natural, zonas de isolamento térmico e ar condicionado assistido por energia solar). Estas considerações levam a que as fachadas passem a ser projectadas, analisadas e operadas como um sistema integrante do edifício e não como um conjunto de elementos definidos apenas pela sua construção e pelo seu impacto directo no mesmo (Lee et al, 2002).

1.2. Contribuição da Tese

O objectivo deste trabalho é contribuir para a avaliação do desempenho energético de fachadas de dupla pele. Actualmente, uma das dificuldades encontradas para avaliar o funcionamento térmico de DSFs é a falta de ferramentas informáticas próprias para simulação do comportamento de fachadas desta natureza. O autor espera com este trabalho contribuir para que, utilizando um programa de simulação térmica de edifícios disponível gratuitamente

ao público em geral (software este que está desenhado para ser adaptado a inúmeras situações) se conclua acerca da sua capacidade de simulação térmica dos elementos alvo da presente tese, abrindo assim portas para que no futuro programadores de software possam concluir acerca da viabilidade de criar interfaces próprios com base neste programa para avaliar o comportamento de fachadas de dupla pele.

1.3. Organização da Tese

O primeiro capítulo deste trabalho inicia com uma introdução genérica ao conceito de fachada de dupla pele, seguindo uma breve história destes elementos desde os primeiros conceitos até á actualidade. De seguida é apresentado um segundo capítulo de fundamentos teóricos, onde é feita uma abordagem aos diferentes modos de classificação consoante algumas características como a configuração da fachada e o seu modo e tipo de ventilação. Após as classificações, é apresentada uma resumida explicação dos mecanismos básicos de transferência de energia que regem o seu funcionamento, onde de seguida é explicada a dinâmica do comportamento térmico destes elementos construtivos com base nestas definições. Como finalização deste segundo capítulo, apresenta-se um resumo das principais vantagens e desvantagens da utilização de DSFs como um elemento dinâmico do edifício para diminuir o impacto térmico experienciado no interior deste.

O terceiro capítulo trata das ferramentas numéricas utilizadas para a modelação e simulação da fachada, com alguma atenção especial para o procedimento e considerações tomadas pelo *EnergyPlus*. É explicado também como é modulada a fachada tendo em conta o seu modo de funcionamento durante as datas de 23 a 28 de Abril de 2008.

O quarto capítulo trata das simulações efectuadas, começando por explicar o tratamento de alguns dados pertinentes a estas últimas, como as condições climatéricas do período em causa para introdução no software, escolha do algoritmo de convecção interna e externa da fachada e uma breve explicação do modelo de cálculo de fluxo de ar que o software *EnergyPlus* aplica. De seguida são apresentados os resultados obtidos das simulações, e é feita uma comparação e análise de parâmetros como a temperatura interna da fachada (e conseqüente diferença de temperatura entre o interior e exterior) e caudais de ar.

2. Fundamentos Teóricos

Uma fachada de dupla pele é um elemento de construção de edifícios cujo objectivo é permitir e manter um equilíbrio estável entre condições interiores de conforto óptimas e as condições ambientais externas ao edifício, de modo a que o seu funcionamento seja adaptável segundo as variações externas de clima e as condições internas de utilização dos espaços. Uma DSF tem assim como base contribuir para uma melhoria das condições ambientais de um espaço interior, reduzindo custos operativos relacionados com sistemas de ventilação, arrefecimento, aquecimento e minimizar também o uso de iluminação artificial (Marques da Silva e Gosselin, 2005).

O termo DSF refere-se a um arranjo de dois panos de envidraçados (figura 3) cuja combinação forme um canal central próprio para passagem de um caudal de ar, ou simplesmente para servir de caixa-de-ar selada, cuja largura poderá situar-se entre poucos centímetros a vários metros. Os envidraçados poderão estender-se a todo um edifício ou somente a uma porção deste. O pano principal, normalmente isolante, encontra-se como parte integrante da estrutura convencional de uma parede, e o pano secundário, normalmente de vidro simples, é colocado na parte posterior ou anterior do pano principal. Os dispositivos de protecção solar são colocados no interior do canal da fachada, de modo a ficarem protegidos contra agentes agressores do meio ambiente, com a vantagem acrescida de serem de menor custo comparativamente a elementos próprios para montagem exterior (Uuttu, 2001).

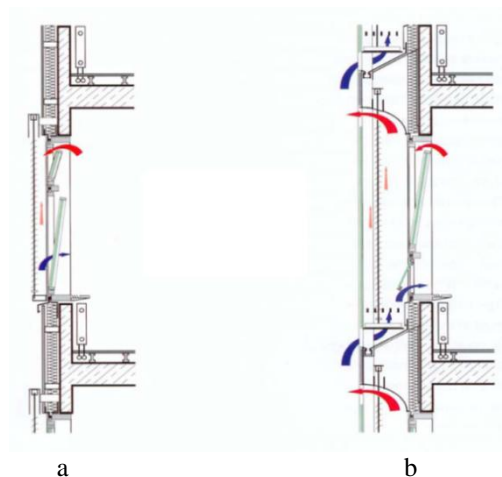


Figura 3 - Comparação entre uma fachada simples (a) e uma fachada de dupla pele (b) (Oesterle et al, 2001).

Uma das grandes características de uma DSF é a existência de um canal interno ventilado, sendo designadas de fachadas ventiladas. O espaço intermédio, mesmo que ventilado, continua a ser utilizado para incluir dispositivos de sombreamento (Saelens, 2002). Este tipo de funcionamento permite um melhor controlo térmico do espaço com vista a reduzir os consumos energéticos necessários para o aquecimento e/ou arrefecimento do mesmo. Uma das vantagens deste tipo de funcionamento é a possibilidade de efectuar ventilação natural através do efeito de chaminé, graças à capacidade de colector solar que o canal possui, acumulando energia térmica proveniente da radiação solar. Neste caso, o caudal é potenciado tanto pelo gradiente de pressão nas entradas e saídas de ar da fachada (conseguido graças ao efeito do vento) como pelo efeito de convecção natural (Marques da Silva e Gosselin, 2005). Com a presença de elementos de sombreamento dentro da fachada, a existência de ventilação nessa zona torna-se mais necessária, de modo a promover o seu arrefecimento (figura 4). Outras vantagens incluem o isolamento de valores extremos de temperatura ambiente, protecção melhorada contra vento e isolamento acústico (Uttu, 2001; Boake et al, 2003).

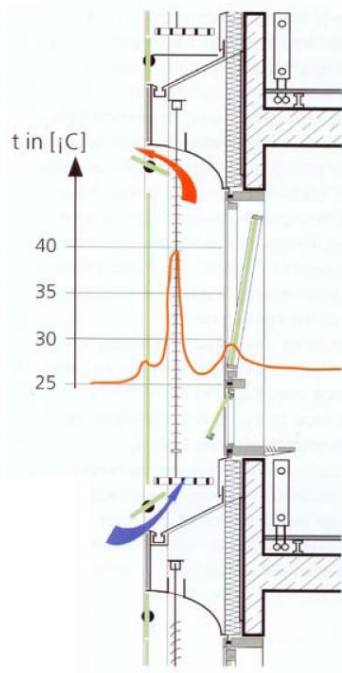


Figura 4 – Curva de temperatura ao longo da secção vertical de uma DSF (Boake, 2004).

Porque o caudal do canal interno da fachada é capaz de retirar energia térmica, principalmente a da radiação solar incidente, e posteriormente libertar o calor do interior da fachada com a saída do ar, esta torna-se capaz de actuar como um elemento controlador de temperatura, permitindo que o pano interior se encontre a uma temperatura mais próxima da interior do espaço, possibilitando melhores condições de conforto (Marques da Silva e Gosselin, 2005).

2.1. Classificação de DSF's

Existem diversos tipos de conceitos de fachadas de pele dupla ventiladas. É necessário desta forma criar um sistema de classificação que permita a distinção entre todas as possíveis soluções e os conceitos que são actualmente utilizados na prática.

Na literatura especializada é possível encontrar diversas classificações de DSFs. Grande parte destas classificações são baseadas em características geométricas das fachadas, e nem sempre é tido em conta o seu modo de funcionamento. (Lancour et al, 2004). Este capítulo apresenta algumas propostas de classificações com base nas metodologias de funcionamento das fachadas (Marques da Silva e Gosselin, 2005).

Para a classificação de DSF's, é comum utilizar como critérios o tipo de ventilação, o tipo de configuração de funcionamento do sistema e os modos de ventilação da fachada.

Nas classificações apresentadas de seguida são tidas em conta as necessárias para a elaboração da presente tese, pelo que, embora se faça referência às mais comuns, nem todas serão explicadas ou aprofundadas.

2.1.1. Tipo de Ventilação

O tipo de ventilação é definido segundo o meio pelo qual é conseguida a passagem de ar pelo canal interno. Cada fachada é caracterizada apenas por uma das seguintes classificações.

- Ventilação Natural, onde a deslocação de ar é conseguida através do efeito de chaminé ou da distribuição de pressões criada pelo vento, ou ambas, sem a existência de componentes mecânicos para o efeito (figura 5-a).
- Ventilação Mecânica, havendo um componente mecânico instalado responsável pelo fluxo de ar (figura 5-b);

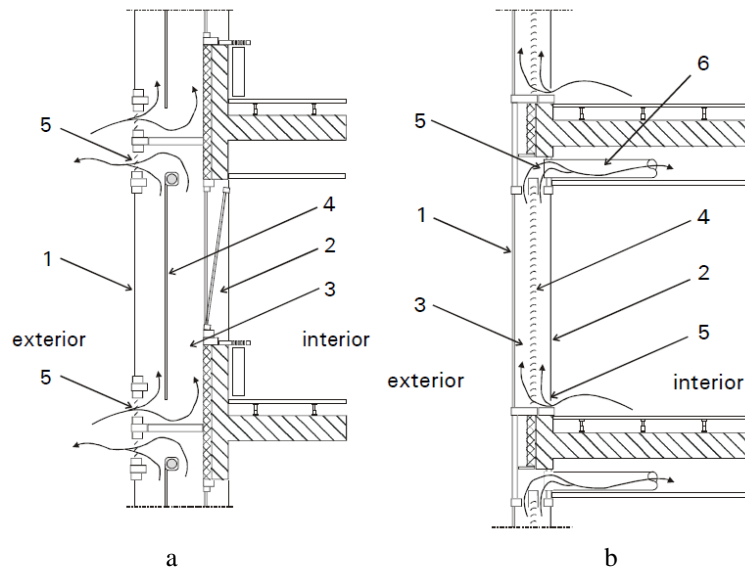


Figura 5 – Tipos de Ventilação: Ventilação Natural - a); e Ventilação Mecânica - b). Legenda: Superfície exterior - 1); Superfície interior - 2); Canal interno - 3); Sombreamento - 4); Aberturas de ventilação - 5); Condução de retorno de ar - 6) (Saelens, 2002).

- Ventilação Híbrida, onde existem ambos os sistemas de ventilação anteriores na fachada, possibilitando que cada um funcione quando as condições exteriores e interiores sejam ideais para tal. Existe um compromisso estabelecido para o funcionamento de um ou de outro. A ventilação mecânica só é utilizada quando as condições externas e internas não possibilitam o funcionamento correcto ou dentro de certos parâmetros de ventilação natural. Um sistema de controlo terá que existir para alternar entre os dois modos de funcionamento de acordo com os parâmetros estabelecidos. Poucas são as fachadas que utilizam este tipo de sistema (Lancour et al, 2004).

É de notar que o tipo de ventilação utilizado influencia directamente o desempenho térmico da fachada, bem como a estabilidade do mesmo ao longo do tempo. Embora seja possível garantir estas eficácias de funcionamento num sistema de ventilação mecânica, não será de todo a mesma situação para um sistema de ventilação natural, já que neste caso os desempenhos estão directamente dependentes das condições meteorológicas (diferenças de temperatura e gradientes de pressão devido ao vento).

2.1.2. Configuração da Fachada

As classificações para as configurações das fachadas têm como base os modelos adoptados pelo Belgium Building Research Institute (BBRI). Outros trabalhos desenvolvidos propõem alterações ao sistema de classificação apresentado pelo BBRI, apresentando algumas simplificações aos modelos propostos (Marques da Silva e Gosselin, 2005). Outras fontes propõem classificações muito similares às apresentadas pelo BBRI (Poirazis, 2006. Pág. 31).

Este método de classificação indica como os canais entre os dois panos das fachadas se encontram divididos fisicamente. As classificações seguintes representam as mais frequentes e utilizadas actualmente.

- Tampão (T): A fachada encontra-se totalmente fechada, funcionando como uma caixa-de-ar. Existe a possibilidade de existir uma abertura para o exterior com o propósito de balanço de pressões (figura 6).



Figura 6 – Tampão (Marques da Silva e Gosselin, 2005).

- Parede Climatizada (PC): A PC é caracterizada por possuir um pano exterior envidraçado duplo e um pano interior simples, com um canal interno muito estreito. Existe apenas recirculação do ar interior pelo canal da fachada apoiada por um sistema de ventilação mecânica (figura 7). O seu funcionamento encontra-se integrado no sistema de AVAC do edifício (Marques da Silva e Gosselin, 2005).

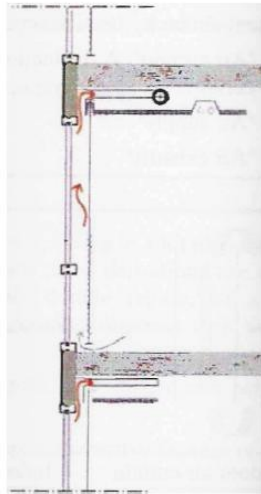


Figura 7 – Parede Climatizada (Marques da Silva e Gosselin, 2005).

- Modular (M): Na configuração modular, a DSF admite o ar pelas entradas inferiores e efectua a saída pelo topo (figura 8). As fachadas encontram-se divididas verticalmente e horizontalmente em módulos, pelo que o canal interno e o respectivo fluxo seja exclusivamente do espaço alvo de cada DSF (Lancour et al, 2004). Existem diferentes possibilidades para a circulação do ar, podendo ser de fluxo exterior com ou sem fluxos cruzados (de modo a evitar a mistura do ar interno de um espaço com o ar de admissão da fachada do piso superior) (Marques da Silva e Gosselin, 2005).

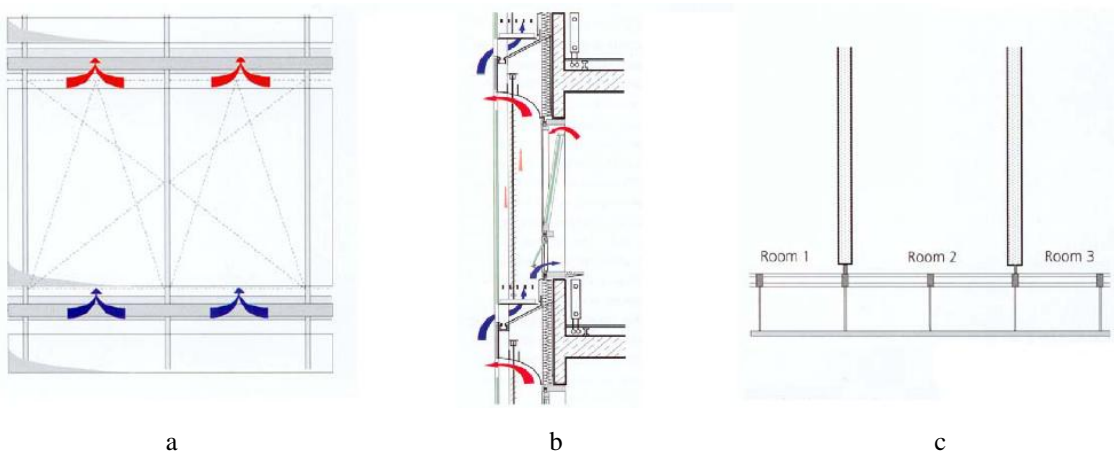


Figura 8 – Configuração Modular: Vista frontal - a); Secção transversal – b); Vista em planta – c)
(Oesterle et al, 2001).

- Coluna de Extração (CE): A configuração é bastante semelhante á modular, com a diferença de que a descarga de ar é feita não directamente para o exterior mas para uma conduta vertical construída no edifício e que se estende ao longo de vários pisos (figura 9). Cada módulo encontra-se conectado a estas condutas, eliminando-se desta forma a possibilidade de mistura de ar interno de uma DSF com o ar de admissão de outra no piso superior. O objectivo desta configuração é potenciar a ventilação natural através do aumento do efeito de chaminé, sendo normal que este tipo de configuração seja utilizado (em prática) só com este tipo de ventilação.

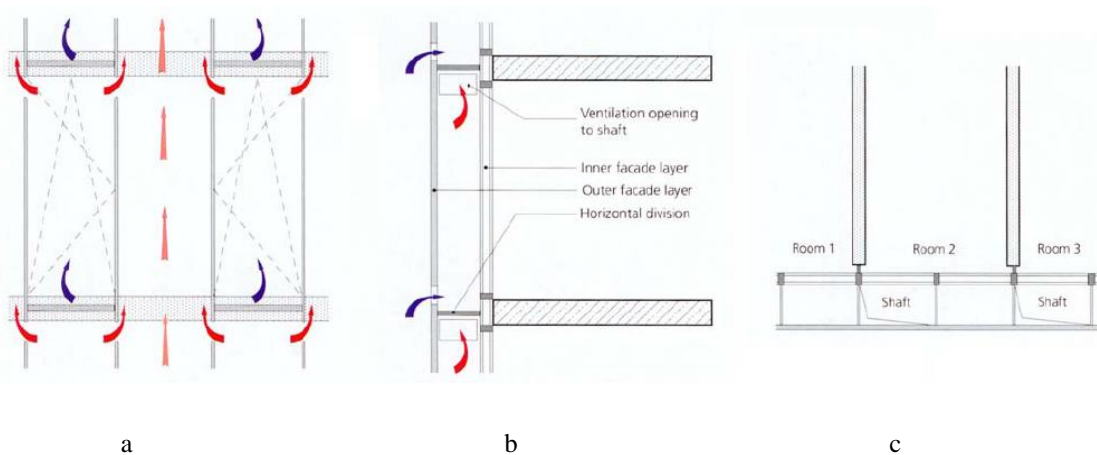


Figura 9 – Coluna de Extração: Vista frontal - a); Secção transversal – b); Vista em planta – c) (Oesterle et al, 2001).

- Corredor (C): As fachadas encontram-se divididas apenas horizontalmente, formando assim um canal interno único ao nível do piso (figura 10). Não se encontram limitadas verticalmente, o que faz com o que o edifício apresente um módulo individual ao nível de cada piso, ou módulos que abrangem diversos espaços do mesmo piso. As entradas e saídas de ar estão colocadas de forma a se evitar a mistura de caudais (Lancour et al, 2004).

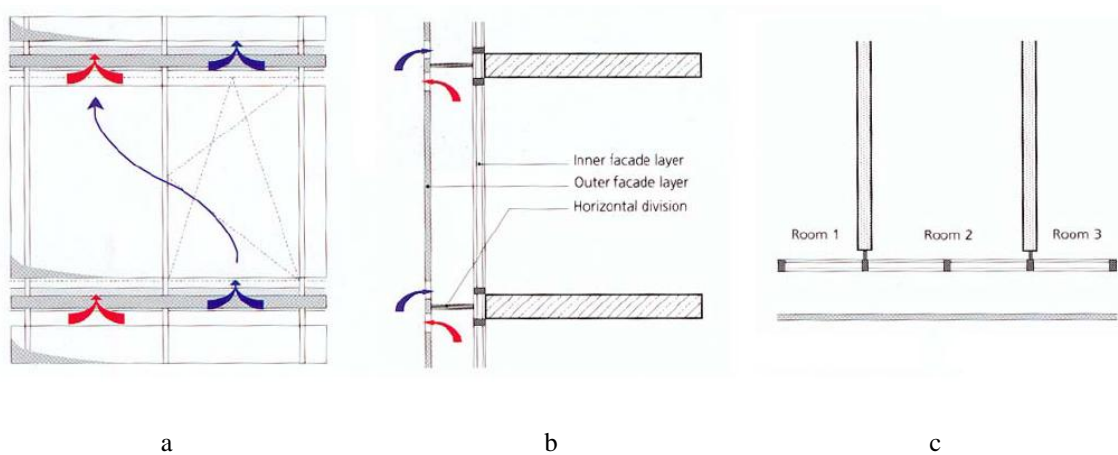


Figura 10 – Corredor: Vista frontal - a); Seção transversal – b); Vista em planta – c) (Oesterle et al, 2001).

- Multi-piso (MP): Este sistema é instalado de modo a que não exista qualquer divisão física na fachada, que apresenta um único canal de grande volume que cobre diversos pisos simultaneamente (figura 11). São ventiladas naturalmente na grande maioria das aplicações, mas alguns casos pontuais possuem ventilação mecânica (Lancour et al, 2004).

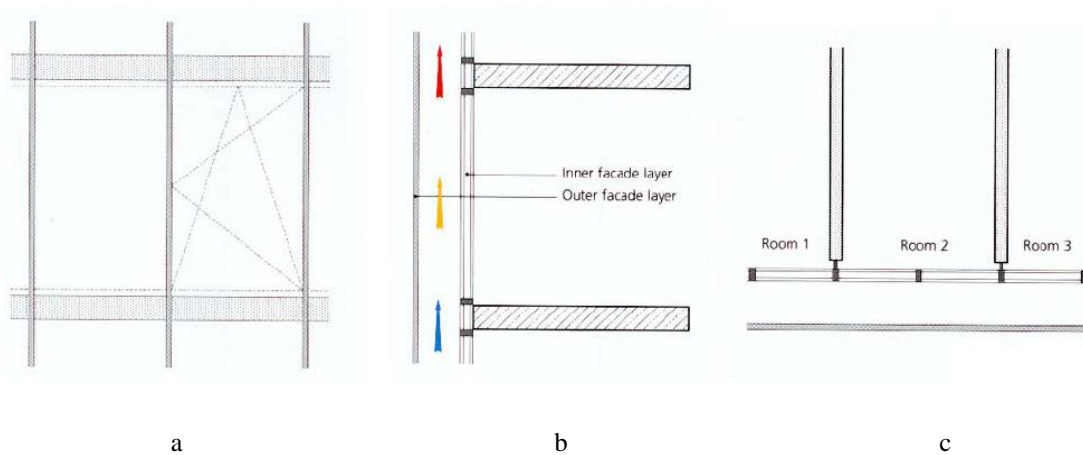


Figura 11 – Multi-piso: Vista frontal - a); Secção transversal – b); Vista em planta – c) (Oesterle et al, 2001).

2.1.3. Tipo de Fluxo

Esta classificação refere-se á origem e destino do ar que circula dentro da cavidade interior da DSF. O tipo de direcção e sentido que o caudal possui ao atravessar a fachada é de extrema importância, pois irá influenciar directamente a distribuição de temperaturas dentro do canal interno (Saelens, 2002), bem como define o modo de interacção com o sistema de ar condicionado do edifício.

Existem várias possibilidades, sendo as mais comuns as seguintes (figura 12):

- Fluxo Exterior (FE). A fachada é ventilada somente com ar exterior, não havendo qualquer entrada ou saída de ar interior pela mesma.
- Fluxo Interior (FI). A fachada é ventilada somente com ar interior, não havendo qualquer entrada ou saída de ar exterior pela mesma.
- Ar de Insuflação (AI), havendo passagem de ar exterior pelo canal interno e a sua entrada para o interior do espaço a condicionar;
- Ar de Exaustão (AE), onde a fachada remove o ar interior do espaço para o exterior;
- Fluxos Reversível (FR), existindo em conjunto as duas configurações anteriores e funcionando cada uma consoante as condições internas/externas e existência de controladores automáticos.

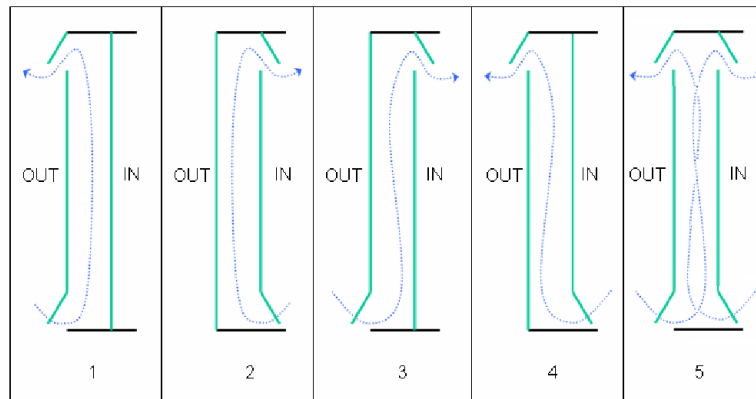


Figura 12 – Modos de ventilação: FE - 1); FI - 2); AI - 3); AE - 4); FR - 5) (Lancour et al, 2004).

Nem todas as configurações são capazes de integrar todos os modos de ventilação aqui descritos, e num dado momento, a fachada é caracterizada apenas por um deles. No entanto, em diferentes alturas, ela poderá adaptar o seu funcionamento para outro modo de ventilação consoante o sistema de controlo detecte condições ambientais favoráveis para tal.

Tanto as fachadas ventiladas naturalmente como as que funcionam através de ventilação mecânica apresentam normalmente várias possibilidades de modos de ventilação, sendo a mudança entre eles garantida por aberturas de ventilação motorizadas.

Determinar qual o melhor modo de ventilação para um determinado momento não é uma tarefa simples. Tal decisão depende de factores como direcção e velocidade do vento, gradientes de temperatura entre a fachada e o exterior, insolação, utilização de portas dentro dos espaços, entre outros (Lancour et al, 2004).

2.2. Fundamentos de Transferência de Calor

Para a compreensão do funcionamento térmico de uma DSF é necessário estabelecer em primeiro lugar os princípios termodinâmicos fundamentais que regem as taxas de transferência de energia entre a fachada, a zona exterior e o espaço interior. Os pontos seguintes descrevem sucintamente os princípios básicos de transferência de calor.

Calor é a forma de energia que pode ser transferida de um sistema para outro como resultado de uma diferença de temperaturas. Uma abordagem termodinâmica lida com a quantidade de energia trocada entre sistemas enquanto estes testemunham um processo de um estado de equilíbrio para outro. Uma análise de transferência de energia define as taxas de energia trocadas entre os sistemas durante esses processos termodinâmicos (Çengel, 2002).

A energia térmica é transferida de uma região para outra através de três modos distintos: condução, convecção e radiação. Os dois primeiros modos de transferência de calor efectuam-se através de massa, potenciados principalmente pela diferença de temperaturas. A radiação é um modo de transferência de energia térmica por ondas electromagnéticas (AHSRAE, 2001).

2.2.1. Condução

A condução térmica envolve o transporte de calor através das interacções de átomos ou moléculas de uma determinada substância (DOE, 1992). Este modo de transferência de energia é um fenómeno que pode ocorrer em qualquer tipo de substância, seja sólido, líquido ou gasoso. Em líquidos e gases, a condução é devida às colisões entre moléculas durante o seu movimento aleatório (nestas substâncias a transferência de energia é conseguida conjuntamente por fenómenos de condução e convecção (AHSRAE, 2001), sendo esta última definida mais à frente neste trabalho). Para sólidos, a condução tem origem na combinação de vibrações de moléculas adjacentes e ao movimento de electrões livres (Çengel, 2002). Seja qual for o tipo de substância, o transporte de energia térmica por condução é devida à transformação de energia térmica em energia cinética ao nível molecular e transferida ao longo do espaço ocupado pela mesma (AHSRAE, 2001).

A taxa de transporte de energia por condução através de uma substância depende dos seguintes factores (Çengel, 2002; DOE, 1992):

- Geometria;
- Espessura;
- Propriedades físicas da substância;
- Diferenças de temperatura ao longo da substância.

A capacidade do material conduzir energia em forma de calor é designada de condutividade térmica (taxa de transferência através de cada unidade de espessura da substância segundo a direcção do fluxo de calor, por cada unidade de área transversal ao mesmo e por cada unidade de diferencial de temperatura (Çengel, 2002)). Esta propriedade é dependente do tipo de material da substância e da temperatura a que este se encontra (Kreith, 1999). A Lei de Fourier traduz a taxa de transferência de energia por condução (AHSRAE, 2001):

$$\dot{Q} = -(kA) \frac{dT}{dx} \quad (1)$$

Onde:

\dot{Q} = Taxa de transferência de calor (W)

k = Condutividade térmica ($W\ m^{-1}\ K^{-1}$)

A = Área normal á direcção do fluxo de calor (m^2)

dT/dx = Gradiente de temperatura (K/m)

O sinal negativo da expressão (1) indica que o fluxo é considerado positivo no sentido decrescente da temperatura. A figura 13 exemplifica graficamente o significado da Lei de Fourier para um pano envidraçado.

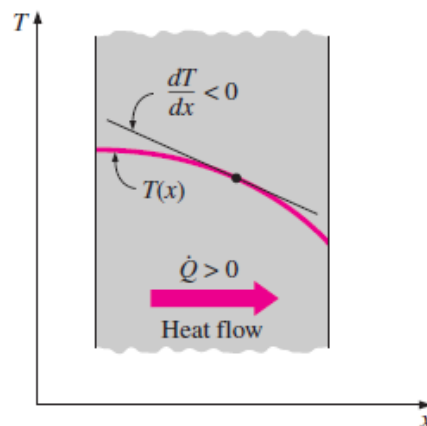


Figura 13 – Condução Térmica (Çengel, 2002).

Esta expressão é aplicada a materiais de composição uniforme, já que este factor influencia o valor da condutividade térmica. Se determinado sistema de massa possuir diferentes densidades ou composições, o fluxo terá que ser determinado para cada uma dessas camadas, pois a condutividade térmica é possivelmente diferente para cada uma delas.

Um outro parâmetro importante de definir para determinação da capacidade de condução de um determinado material é a difusidade térmica, que representa a rapidez de um fluxo de calor difundir-se através da substância (Çengel, 2002):

$$\alpha = \frac{k}{\rho \cdot C_p} \quad (2)$$

Onde:

α = Difusidade Térmica (m^2/s)

k = Condutividade térmica ($\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$)

ρ = Massa específica (kg/m^3)

C_p = Calor específico a pressão constante ($\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$)

A condutividade térmica determina a capacidade condutora de uma substância e o termo ρC_p representa a quantidade de energia que consegue armazenar por unidade de volume. Assim, a difusidade térmica pode ser interpretada como um rácio entre a energia conduzida através do material e a quantidade de energia mantida por ele por unidade volume (Çengel, 2002). Este parâmetro é importante para casos onde a condução térmica é transiente, ou seja, os parâmetros que a definem não são constantes no tempo. Para estes casos, são estabelecidos diversos modelos numéricos para determinar o fluxo de energia térmica (AHSRAE, 2001) devido á facilidade em retirar dados experimentais. A desvantagem destes métodos é que o fluxo de calor estabelecido e definido por eles afasta-se dos princípios físicos que regem a própria transferência de energia, já que têm por base dados experimentais.

2.2.2. Convecção

A convecção é um modo de transporte de energia entre uma superfície sólida e a passagem de um fluido líquido ou gasoso em movimento e envolve fenômenos de transferência por movimento do fluido e por condução térmica (AHSRAE, 2001).

A velocidade de passagem do fluido determina a taxa de transferência de calor. Um fluido estagnado transfere energia para uma substância sólida exclusivamente através de processos de condução térmica. Se o fluido se encontra animado de movimento, a taxa de transferência de energia aumenta entre este e a superfície adjacente (Çengel, 2002). Deste modo, a sua análise é mais complexa pois não existe uma única propriedade de transferência de calor que possa ser definida com base nas características físicas da substância para quantificar este mecanismo como acontece com a condução, onde é definido um coeficiente de condutividade.

Os fenômenos de convecção variam de situação para situação, dependendo das condições e propriedades do escoamento do fluido. Por esta razão, a caracterização deste mecanismo é obtida através de relações empíricas a partir de dados experimentais (DOE 1992). Mais concretamente, esta abordagem provem da existência de zonas de diferentes características no fluxo (figura 14). Assim, é possível definir três regiões distintas (supondo que o número de Reynolds é suficientemente elevado) (AHSRAE 2001):

- Zona laminar: imediatamente adjacente ao sólido em contacto com o fluido. A transferência de calor do fluido desta zona para a substância sólida é, segundo os princípios estabelecidos para a condução térmica, devido a duas razões: (1) condição de velocidade nula da camada de fluido adjacente ao sólido (originada pela resistência viscosa do fluido); (2) condição de igual temperatura entre este e a camada adjacente (Çengel, 2002);
- Zona transiente: zona de maior turbulência, havendo uma mistura de efeitos de transferência de calor tanto por condução como pelo movimento aleatório e macroscópico do fluido;

- Zona turbulenta: Onde o número de Reynolds é elevado, havendo total turbulência do fluido. O mecanismo de transferência de calor dominante é a convecção provocada pela maior intensidade de movimento turbulento do mesmo.

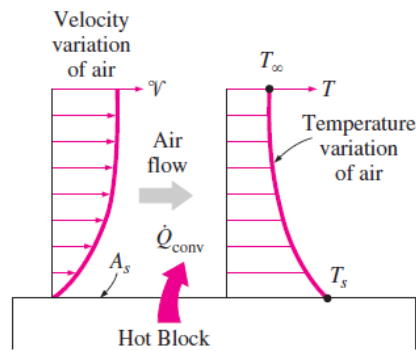


Figura 14 – Convecção térmica (Çengel, 2002).

Quanto maior a turbulência do fluido, menor será a região laminar, pelo que a transferência de calor por convecção aumenta relativamente ao peso do transporte de energia por condução. Os factores que influenciam o mecanismo de convecção e que levam este processo a ser tratado empiricamente devido ao seu complexo funcionamento são (DOE, 1992; Çengel, 2002):

- Viscosidade do fluido;
- Condutividade térmica;
- Densidade;
- Calor específico;
- Velocidade do fluido;
- Tipo de escoamento (turbulento ou laminar);
- Geometria e rugosidade da superfície;

É possível estabelecer uma relação matemática entre o fluxo de calor e um coeficiente de convecção, obtido por métodos empíricos, como já foi referenciado. De notar que este coeficiente não é uma propriedade do fluido, pois ele depende de todas as variáveis mencionadas anteriormente (Çengel, 2002).

$$\dot{Q} = (hA) \cdot dT \quad (3)$$

Onde:

- \dot{Q} = Taxa de transferência de calor (W)
- h = Coeficiente de convecção térmica ($W m^{-2} K^{-1}$)
- A = Área normal à direção do fluxo de calor (m^2)
- dT = Gradiente de temperatura (K)

Note-se que o diferencial de temperatura da expressão (3) é estabelecido entre a superfície do sólido e a temperatura média do fluido, e não a temperatura da camada de fluido adjacente, pois já foi assumido que esta é igual à temperatura da superfície de contacto. No seguimento das considerações tomadas para o efeito de convecção térmica, é possível distinguir dois tipos deste mecanismo de transferência de calor: convecção natural e convecção forçada.

2.2.2.1. Convecção Natural

Transferências de calor por convecção natural ocorrem quando o movimento do fluido é potenciado por diferenças de densidade que são elas próprias causadas pelo aquecimento (Kreith, 1999), havendo deslocação por gravidade de camadas do fluido de menor densidade devido ao aumento de temperatura. A magnitude da transferência de energia por convecção natural é determinada pelo caudal de ar deslocado, que por sua vez depende da diferença de temperatura entre as porções de fluido quente e frio e as forças viscosas internas do mesmo, que se opõem ao movimento das suas camadas. A figura 15 ilustra representações esquemáticas de ventilação natural.

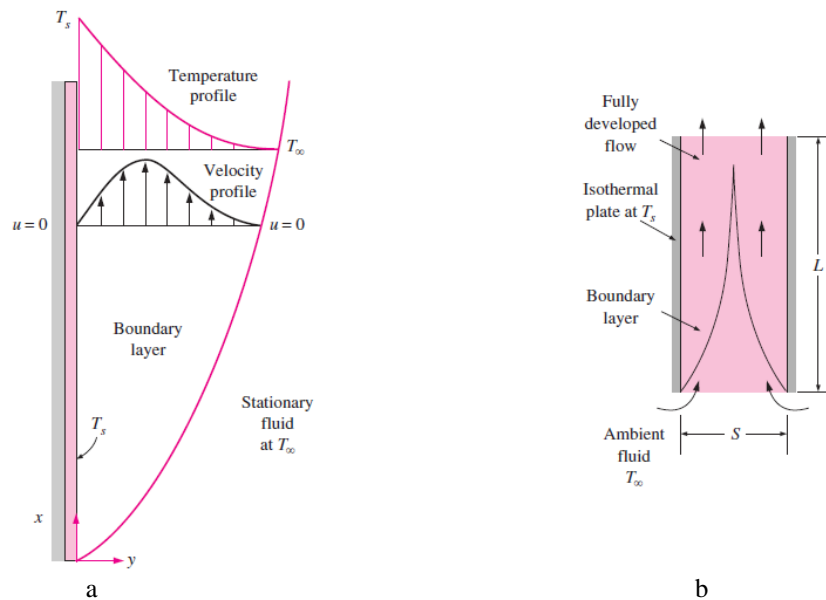


Figura 15 – Convecção Natural: Perfis de velocidade e temperatura numa placa vertical – a); Escoamento do fluido entre um canal formado por duas placas - b) (Çengel, 2002).

No entanto, devido á natureza das fachadas de dupla pele, o perfil de velocidades da deslocação de ar no interior da fachada é assimétrico. Tendo em conta que o potencial de deslocamento do ar é a redução de densidade devido ao aumento de temperatura, é natural que as velocidades sejam mais elevadas nas zonas espectáveis de possuírem maiores cargas térmicas, nomeadamente os envidraçados e os elementos de sombreamento. A figura 16 apresenta um possível perfil de velocidades no interior de uma fachada de dupla pele ventilada (Grabe, 2002).

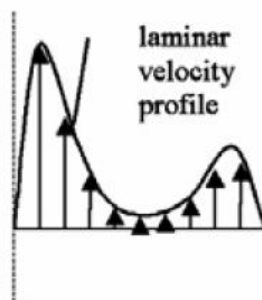


Figura 16 – Perfil de velocidades no interior de uma DSF (Grabe, 2002).

Os fenómenos que influenciam o efeito de transferência de calor por convecção natural são (AHSRAE, 2001):

- Força gravitacional devido á expansão térmica;
- Resistência viscosa do fluído;
- Difusidade térmica, definida na equação (2);
- Propriedades do fluído;
- Diferença de temperatura entre o fluído e o sólido;
- Comprimento característico da superfície de contacto.

Baseado nestes princípios, a mesma fonte também refere as propriedades físicas que directamente influenciam o coeficiente de convecção natural h a aplicar na equação (3):

- Aceleração gravítica, g (m/s²);
- Coeficiente de expansão térmica, β (1/K);
- Viscosidade cinemática, ν (m²/s);
- Difusidade térmica, α ;
- Massa específica do fluído, ρ (kg/m³);
- Calor específico do fluído, c_p (J kg⁻¹ K⁻¹);
- Diferença de temperatura, ΔT (K).

O coeficiente de expansão térmica indica a taxa de expansão de volume de uma substância para uma determinada diferença de temperaturas. Para gases perfeitos, como o ar, este coeficiente é calculado como $\beta = 1/T$ (Çengel, 2002). A determinação do coeficiente de convecção natural passa pela aplicação de métodos numéricos baseados nas variáveis acima descritas, bem como em outros coeficientes relacionados com o tipo de escoamento (laminar ou turbulento) e a configuração física do sistema (AHSRAE, 2001). Por estas razões, a determinação deste coeficiente é complexa, como já foi referido. Não é do âmbito desta tese demonstrar as considerações físicas e/ou empíricas por detrás destes métodos. Para mais informações, consultar as fontes referenciadas.

2.2.2.2. Convecção Forçada

Quando o movimento do fluido em contacto com o sólido é causado por uma fonte exterior, a convecção designa-se de forçada. A grande diferença para a transferência de energia por convecção natural é que o caudal de fluido não é estabelecido pelos mesmos princípios (nomeadamente aquecimento/arrefecimento do mesmo, inculcando diferenciais de temperatura que levam á estratificação do fluido em zonas de diferentes densidades).

A determinação do coeficiente de transferência de calor para convecção forçada passa muito pela aplicação de métodos numéricos baseados em dados obtidos experimentalmente sob condições cuidadosamente controladas, existindo na melhor das hipóteses erros na ordem de aproximadamente 10% quando aplicados a casos que possuam registos experimentais (Kreith, 1999).

Uma situação de transferência de calor por convecção envolve os dois métodos de convecção referidos. As propriedades do fluido, as características do escoamento e as temperaturas envolvidas ditam qual dos dois modos de convecção tem maior impacto sobre a transferência de energia. Se um sistema apresenta um fluido com velocidades de escoamento elevadas e com um fraco coeficiente de expansão térmico, a transferência de calor será regida principalmente por convecção forçada. O contrário acontece para a convecção natural. É também de referir que, dado a natureza exterior da força impulsionadora do escoamento, a convecção forçada é o mecanismo de transferência de calor que possibilita maiores taxas de transferência, pois a convecção natural encontra-se mais dependente das condições a que o fluido está sujeito, as suas propriedades termodinâmicas e a configuração geral do sistema em causa.

2.2.3. Radiação

A transferência de energia por radiação (designada de energia radiante), ao contrário dos mecanismos de convecção e condução, não necessita de massa para ser transmitida. A radiação consiste em partículas de energia sem massa, designadas de fótons, transportadas através de ondas electromagnéticas. Estas partículas têm origem nas alterações das

quantidades energéticas existentes num corpo ao nível molecular (Kreith, 1999). As quantidades e características da energia radiante térmica emitida por um corpo dependem das características físicas do material em causa, o seu arranjo molecular e a sua temperatura absoluta (AHSRAE, 2001). Qualquer corpo com temperatura acima do zero absoluto emite alguma energia radiante, tanto maior quanto mais elevada for o seu valor (DOE, 1992).

A transferência de energia por ondas electromagnéticas é caracterizada em primeiro lugar pelo comprimento de onda pelo qual a energia radiante é transportada. Dependendo da natureza da fonte emissora, a energia radiante será propagada através de determinados comprimentos de onda. O efeito desta energia radiante sobre outros corpos estará dependente das características que estes possuem para esses valores. A energia radiante térmica compreende-se entre 0,1 e 100 μm . Dentro desta banda é possível ainda distinguir as seguintes zonas (figura 17):

- Ultra-violeta: compreendida entre 10^{-2} e 0,4 μm (embora não abrange por completo o espectro de radiação térmica, tem algum peso no mesmo);
- Radiação Solar: compreendida entre 0,1 e 3 μm ;
- Domínio Visível: para comprimentos de onda entre os 0,4 e 0,7 μm . Energia radiante recebida pelos corpos com comprimentos de onda nesta gama de valores, quando reflectida por estes é vista pelo olho humano, estando na origem da estratificação das cores;
- Infravermelho: desde os 0,7 μm até sensivelmente os 1000 μm . Esta gama também não está incluída por completo na gama de comprimentos de onda de energia radiante térmica do mesmo modo que foi referido para a radiação ultra-violeta.

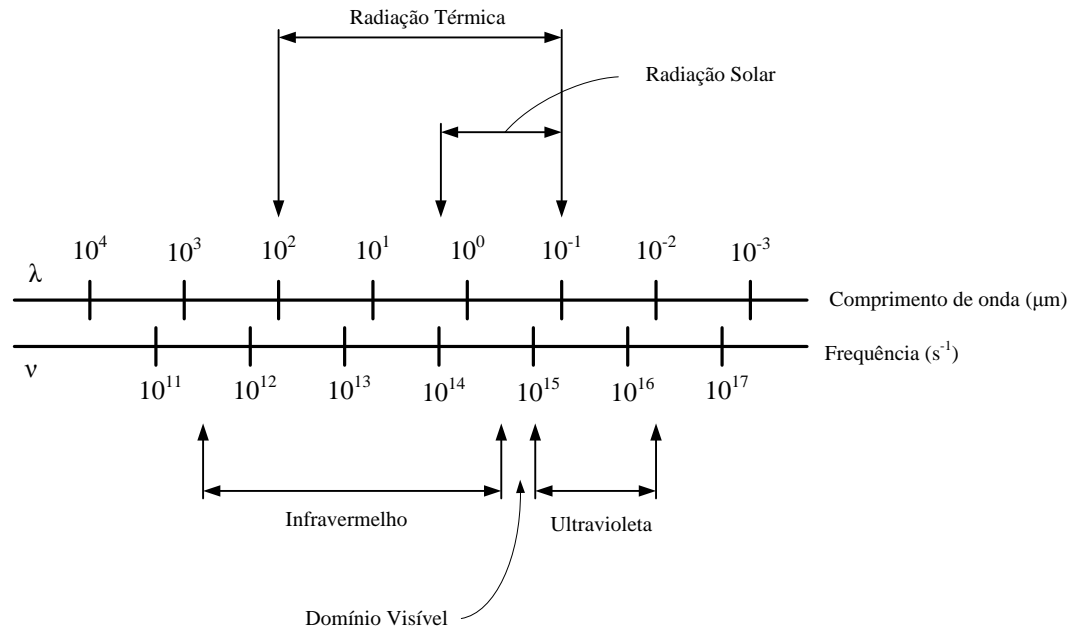


Figura 17 – Espectro Electromagnético.

A radiação térmica é considerada como um fenómeno superficial para substâncias opacas. De facto, a radiação é um fenómeno volumétrico, mas para objectos não transparentes a radiação emitida pelo seu interior nunca atinge a sua superfície, e a radiação recebida por outras fontes é normalmente absorvida a poucos microns da mesma.

Para um determinado sólido é possível definir quatro propriedades fundamentais de radiação (Kreith, 1999):

- Emissividade

Para definir esta propriedade, é importante referir em primeiro lugar a definição de corpo negro. Um corpo negro é um elemento sólido capaz de absorver por completo toda a energia radiante incidente (AHSRAE, 2001) assim como emitir a máxima quantidade de energia para o seu valor de temperatura absoluta (Çengel, 2002). A radiação absorvida e emitida por todas as superfícies de corpos reais é sempre inferior á energia radiante que o corpo negro é capaz de absorver e emitir, respectivamente.

A emissividade ε é a capacidade de um corpo real emitir energia radiante comparativamente ao corpo negro sobre as mesmas condições de temperatura:

$$\varepsilon = \frac{\text{Energia emitida por uma superfície de um corpo real}}{\text{Energia emitida por um corpo negro á mesma temperatura}} \quad (4)$$

- Absorsividade, Reflectividade e Transmissividade

Estas três propriedades definem como um corpo interage com a radiação recebida. A absorsividade α é definida como a quantidade de energia absorvida por um corpo real comparativamente á energia total emitida pela fonte e recebida pelo mesmo corpo. Do mesmo modo, parte da energia total é reflectida, sendo esta característica designada de reflectividade ρ e outra parte é transmitida através do corpo, definindo a transmissividade τ :

$$\alpha + \rho + \tau = 1 \quad (5)$$

A equação (5) demonstra simplifadamente que a energia radiante recebida por um corpo é sempre decomposta nestas três parcelas. As características físicas do corpo, bem como o arranjo geométrico onde ele se encontra determinam o peso relativo de cada uma delas.

2.2.4. Transferência Global de Energia

Tendo em consideração os fenómenos de transferência de calor mencionados, é necessário ter em consideração os casos que mais se aproximam á realidade, onde um fluxo de calor percorre mais que um meio até chegar á fonte de menor temperatura. Para tal define-se um coeficiente global de transferência de energia U para esse fluxo (AHSRAE, 2001).

$$\dot{Q} = (UA) \cdot dT \quad (6)$$

Onde:

\dot{Q} = Taxa de transferência de calor (W)

U = Coeficiente global de transferência de energia ($W m^{-2} K^{-1}$)

A = Área normal á direcção do fluxo de calor (m^2)

dT = Gradiente de temperatura (K)

A determinação deste coeficiente passa pela consideração das resistências térmicas dos diferentes meios que estão envolvidos na passagem do fluxo de calor. Estas resistências térmicas são definidas como o inverso de cada coeficiente de transferência de calor de cada meio. Considerando um fluxo de calor que passa por n camadas:

$$\frac{dt}{\dot{Q}} = \frac{1}{UA} = \sum_0^n R_i \quad (7)$$

Onde:

R_i = Resistência térmica (K/W)

Para um meio de transferência de calor por condução, a sua resistência térmica R_0 é definida como:

$$R_0 = \frac{dx}{kA} \quad (8)$$

Para convecção, a resistência térmica R_c vem:

$$R_c = \frac{1}{hA} \quad (9)$$

É igualmente possível determinar uma resistência térmica para um meio cujo modo de transferência de energia é a radiação. A resistência neste caso, R_r , vem como:

$$R_r = \frac{1}{h_r A} \quad (10)$$

Onde h_r é definido como um coeficiente de radiação, cujo valor é função das temperaturas, propriedades radiativas e o arranjo geométrico do meio envolvente e o corpo em causa (AHSRAE, 2001).

2.3. Princípios de Funcionamento

Para atingir os seus objectivos, uma fachada de dupla pele envidraçada tira partido de uma circulação de ar que atravessa o canal interno de modo a reduzir o impacto térmico devido às solicitações do meio ambiente no edifício. Como já foi referido, esta passagem de ar poderá ser potenciada por ventilação natural, mecânica, híbrida ou simplesmente não existir caudal, actuando o canal como caixa-de-ar.

A figura 18 representa os princípios físicos associados ao impacto térmico devido á radiação solar, condução e convecção da fachada dupla, e a relação destes com a passagem de ar no canal de uma fachada ventilada naturalmente.

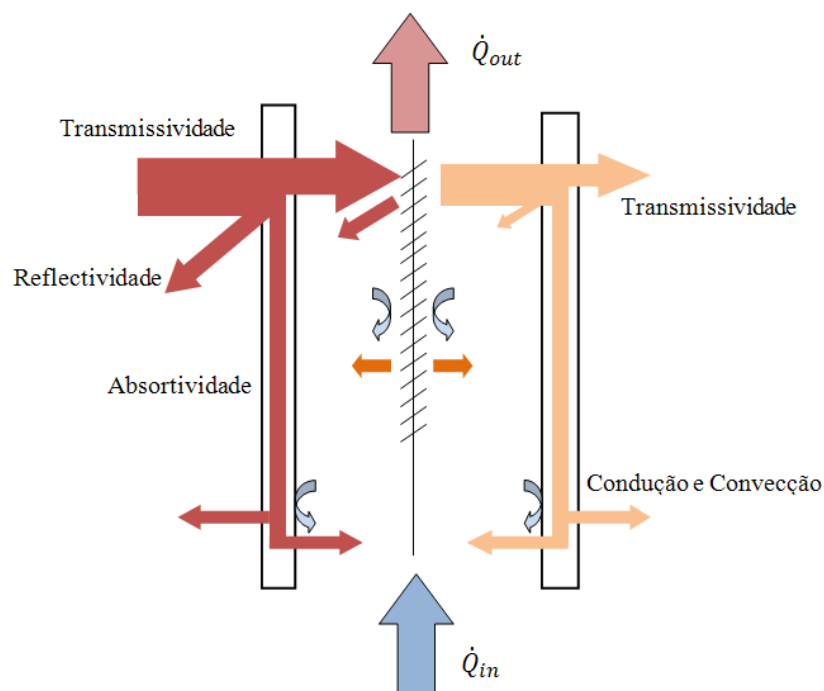


Figura 18 – Trocas de Calor no canal de uma DSF.

A da figura 18 ilustra esquematicamente a proporção de energia térmica retirada da fachada pelo caudal de ar de passagem. Através de processos de convecção, parte da energia térmica proveniente da radiação solar que aquece o sistema de sombreamento é absorvida pelo ar, bem como uma parcela de energia solar que aquece o envidraçado. As proporções de energia solar absorvida dependem das propriedades ópticas do vidro de ambos os panos da fachada e do sistema de sombreamento (Marques da Silva e Gosselin, 2005). O próprio aquecimento do ar dentro da fachada promove o seu deslocamento vertical, possibilitando assim processos de convecção natural. As diferenças de pressão provocadas pela passagem do vento são consideradas fontes de energia externa que causam o fluxo, havendo deste modo o efeito de convecção forçada. Assim, através de convecção natural e forçada, a passagem de ar promove o arrefecimento dos envidraçados e do sombreamento.

A transferência de energia radiante solar através dos envidraçados é regida pelas propriedades destes: absorvidade, reflectividade e transmissividade. Devido à natureza mais opaca do sombreamento, a transmissividade neste elemento será muito inferior, pelo que será este o que estará sujeito às maiores cargas térmicas radiantes.

Uma outra característica dos envidraçados que é amplamente utilizada é o factor solar g . Este factor indica a quantidade de radiação solar transmitida ao espaço através de envidraçados, englobando a radiação transmitida directamente para o interior e a energia radiante absorvida pelo pano interior, que é retransmitida para o espaço através de radiação (emissividade) e de convecção térmica (Jensen et al, 2008). É de notar que este factor é normalmente indicativo das propriedades do envidraçado, e não pode ser tido em conta como propriedade da própria DSF, acontecendo o mesmo para o coeficiente global de transferência de energia U (Faggembau et al, 2003; Doebber e McClintock, 2006). Estas razões devem-se ao facto de estes coeficientes serem estabelecidos normalmente para um fluxo de calor em regime estacionário e de uma única direcção, o que não se verifica na prática. Isto deve-se às temperaturas da superfície do vidro e o efeito de sombreamento aumentarem com a altura da DSF. Devido a esta estratificação de temperaturas nos panos, o valor do factor solar local varia igualmente com a altura dos envidraçados (devido à variação em altura do poder emissivo), pelo que afecta o seu valor global relativamente à área total do vidro (Jensen et al, 2008).

O coeficiente de transferência de calor por convecção afecta também o valor do coeficiente global U , pelo que as mesmas limitações são validas para este coeficiente. Sem

uma validação própria, estas propriedades fornecidas pelos construtores dos elementos da fachada são apenas indicadores das características desses mesmos elementos, e não propriedades de uma DSF como um sistema funcional e dinâmico.

Uma outra característica do funcionamento de uma DSF é o seu envolvimento com fenómenos de condensação dos envidraçados (Saelens, 2002). Em climas frios, a condensação no interior da fachada é um problema a ter em consideração, e o controlo deste fenómeno depende da configuração da mesma. Para configurações de fluxo interior, a condensação poderá ocorrer caso a temperatura da superfície dos envidraçados seja suficientemente baixa para atingir o ponto de orvalho do ar interior (caso este tenha humidade absoluta suficiente para que tal aconteça). Para caudais de ar em fluxo exterior, a possibilidade de condensação é menor, pois o vidro encontra-se normalmente a uma temperatura superior relativamente á do ar de entrada.

2.4. Vantagens e Desvantagens

Baseando-nos na literatura existente, diversas vantagens e desvantagens são apresentadas dependendo do tipo de DSF utilizada para cada localização em particular. As seguintes características apresentadas são consideradas como as mais importantes como critérios de desempenho da DSF (Poirazis, 2006).

- Isolamento Acústico

Uma das vantagens mais aparentes do funcionamento de uma DSF é a sua capacidade de isolamento acústico, razão que levou a várias implementações de fachadas de dupla pele (Lee et al, 2002). Devido á presença de dois panos de envidraçado na fachada, a eficiência de isolamento sonoro de DSFs aumenta comparativamente a soluções de fachadas simples (Saelens, 2002). O pano exterior reflecte eficazmente o som exterior, reduzindo os níveis de ruído experienciados internamente, mesmo que janelas montadas no pano interior se encontrem abertas (Marques da Silva e Gosselin, 2005). No entanto, é possível identificar algumas desvantagens que as DSFs possam apresentar caso não se tenham tomado as devidas precauções durante a fase de projecto:

- O pano exterior só é capaz de eficazmente atenuar os níveis de ruído externos se as entradas e saídas do fluxo de ar do canal interno não forem demasiado grandes (Roth et al, 2007). Caso contrário, o isolamento acústico do interior relativamente ao exterior não é garantido. Isto poderá ser problemático em casos de ventilação natural, onde estas entradas são por vezes grandes para garantir um determinado caudal na fachada (Roth et al, 2007).
- Para casos onde níveis excessivos de ruído tenham origem no interior do edifício/espço em causa, a DSF poderá impedir a sua difusão para o exterior, reflectindo o som de volta para a sua origem (Marques da Silva e Gosselin, 2005);
- Para DSFs com canais internos que se estendem vertical ou horizontalmente para outros espaços, existe a possibilidade de transmissão de som para esses locais. Esta desvantagem poderá ocorrer principalmente se as entradas e saídas de ar interior encontrarem-se abertas para permitirem a ventilação natural (Saelens, 2002).
- A própria DSF poderá ser uma fonte de ruído devido á passagem de ar pelo canal interno. Obstáculos no interior da fachada e entradas/saídas de ar mal projectadas podem provocar um ruído agudo devido á passagem de caudal. Velocidades demasiado elevadas do ar e má fixação dos elementos de sombreamento poderão estar igualmente na origem de ruídos incómodos (Saelens, 2002).

- Isolamento Térmico

Como já foi descrito, o funcionamento de uma DSF melhora as condições térmicas a que o espaço que ela trata está sujeito. Durante o inverno, o pano exterior promove um melhor isolamento térmico da fachada. As mais baixas velocidades do ar e as temperaturas mais elevadas relativamente ao ar exterior promovem um baixo coeficiente de convecção no canal interno. Este conceito depende da localização do edifício, parâmetros climáticos locais e a quantidade de horas dia disponíveis (Poirazis, 2006). Ainda durante a estação fria, o aquecimento do ar de passagem da fachada devido á incidência da radiação solar possibilita a introdução deste caudal de ar extraído da DSF no sistema de ventilação e ar condicionado

(figura 19-a) (Marques da Silva e Gosselin, 2005), providenciando a melhoria de conforto térmico com menores consumos energéticos por parte do sistema de AVAC.

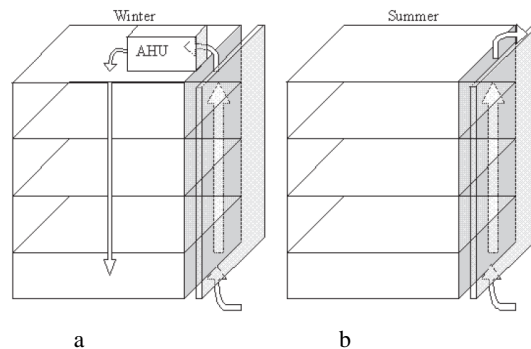


Figura 19 – Funcionamento das fachadas de dupla pele no: Inverno – a); Verão – b) (Poirazis, 2006).

Na estação quente, se a fachada funcionar em regime de fluxo externo, é vantajoso que este caudal sirva para proporcionar a extracção do ar interno do espaço e promover o arrefecimento do mesmo (figura 19-b). Para fluxo de ar de extracção, este é directamente retirado do interior do espaço e expelido para o exterior. Seja qual for o caso, é necessário um cuidado acrescido no projecto da DSF para garantir que as temperaturas no interior do canal durante a estação quente não sejam excessivas (Poirazis, 2006).

Em termos gerais, é possível apontar outras vantagens no que se referem ao comportamento térmico de DSFs caso o seu funcionamento seja aprovado como eficiente: ventilação durante o período nocturno, redução do impacto ambiental devido á diminuição dos consumos energéticos e melhor protecção e arrefecimento dos elementos de sombreamento.

Certas desvantagens podem ocorrer nas fachadas relativamente a questões térmicas. O sobreaquecimento dos elementos internos do canal de passagem de ar é um factor importante, bem como o desconforto térmico devido às temperaturas elevadas do pano interior. Estes factores podem ser resolvidos implementado um sistema de ventilação mecânica para aumentar o caudal de passagem pela fachada (havendo um maior consumo de energia que terá que ser reflectido na eficiência global da fachada) (Poirazis, 2006). Durante a estação de inverno, a temperatura superior do envidraçado interior pode promover um maior conforto aos ocupantes mas é necessário um controlo da temperatura do ar de saída pela porção superior da

DSF. A sua temperatura elevada poderá causar um aquecimento excessivo nas porções do edifício que possam estar adjacentes á zona superior da fachada, criando uma situação de desconforto devido a aquecimento excessivo (Roth et al, 2007).

- Ventilação Natural

Sem necessidade de repetição, já são claras as vantagens obtidas pela utilização de uma DSF que opere por ventilação natural: redução dos consumos de energia durante os períodos de ocupação, aumentado também o conforto térmico (Poirazis, 2006). No entanto, existem certos aspectos que tornam este tipo de ventilação desvantajoso caso não sejam considerados durante as fases de projecto: o tipo de funcionamento da fachada (para além de usar ventilação natural) terá que ser cuidadosamente seleccionado em função dos objectivos pretendidos e das condições climáticas do local. Funcionando em ventilação natural, a eficiência da DSF é claramente dependente das condições externas, devido á natureza extremamente transiente do caudal de ar que é muito sensível a variações climáticas (Jensen et al, 2008).

- Iluminação Natural

O uso de iluminação natural poderá ser melhorado pela presença de uma DSF, potenciando deste modo poupanças nos consumos energéticos relativamente ao uso de iluminação artificial (Marques da Silva e Gosselin, 2005). No entanto, devido á natureza de duplo envidraçado da fachada, a transmissão de luz pelos panos até ao interior é reduzido entre 10 a 20% comparativamente com panos simples (Saelens, 2002) o que torna necessário o uso de elementos no interior da fachada que potenciem o uso de iluminação natural. Estes elementos poderão, se bem projectados, melhorar significativamente a iluminação durante o dia, ao mesmo tempo que permitem o controlo da mesma. Para tal, é necessário ter em conta o comportamento térmico destes elementos no interior da fachada (de modo a garantir o seu correcto funcionamento em zonas de elevadas temperaturas) bem como a obstrução que eventualmente poderão causar á passagem de ar pelo canal interno (Saelens, 2002).

- Acção do Vento

O efeito que a DSF causa na distribuição do efeito de pressão causado pelo vento ao longo da fachada influencia o seu funcionamento, especialmente em casos de ventilação natural. Nestes casos, o caudal de ar não só depende do efeito de convecção natural e do coeficiente de descarga das entradas/saídas de ar, mas também da distribuição de pressões externas devido ao efeito do vento (Uuttu, 2001).

A pressão do vento pode ser dividida em duas componentes: o efeito causado pela pressão estática, considerado como constante, e o efeito causado por uma componente turbulenta, relacionada com a velocidade e direcção do vento (Marques da Silva e Gosselin, 2005). Os efeitos causados pela componente turbulenta são atenuados pelo pano exterior da DSF, possibilitando a abertura de janelas internas (montadas nos envidraçados interiores) e a ventilação natural mesmo em fachadas montadas em edifícios de grande altura.

Como conclusão, é aparente que a aplicação de DSFs devidamente projectadas pode trazer poupanças moderadas nos consumos de energia, mas com o risco de um aumento do custo de implementação e com um esforço acrescido na fase de projecto. De momento é provável que outras tecnologias e abordagens possam atingir os atributos positivos de DSFs com uma melhor relação custo/benefício (Roth et al, 2007).

3. Ferramentas Numéricas e Modelação

O uso de DSFs aumentou durante a última década. Existem diversas razões para este facto, como a procura de diminuição dos consumos energéticos, melhorar as condições internas do edifício bem como o nível de conforto, isolamento sonoro e até mesmo questões relacionadas com a estética do edifício (Jensen et al, 2008). No entanto, a influência de DSFs no ambiente interior e nos consumos energéticos são muito difíceis de prever, especialmente em fachadas ventiladas naturalmente. Estas dificuldades estão presentes devido aos complexos princípios físicos que determinam a passagem de ar pelo canal interno, bem como a sua natureza extremamente transiente.

Modelar correctamente a performance energética de uma DSF é um processo que por si só é complexo devido á interacção dinâmica de diversos factores, que incluem (Marques da Silva e Gosselin, 2005; Roth et al, 2007):

- Desempenho térmico e óptico da fachada;
- Performance aerodinâmica do caudal de ar no interior da DSF (sendo que a complexidade deste processo de modelação aumenta para o caso de ventilação natural);
- Características e operação dos elementos de sombreamento;
- Transmissão da quantidade de iluminação natural;
- Performance térmica do sistema de caixilharia e restantes elementos de suporte físico da fachada;
- Variações em termos de geometria e configurações disponíveis, apropriadas para diferentes casos em função dos objectivos a atingir pela fachada como também pelas condições ambientais a que fachada estará sujeita;
- Correcta manipulação dos dados climáticos, especialmente para ventilação natural (temperatura seca, humidade, vento, radiação e iluminância).

Actualmente não existem disponíveis ferramentas numéricas desenvolvidas especificamente para modelação de fachadas de dupla pele, bem como há falta de uma base de dados sistemática e devidamente sustentada com informações empíricas do desempenho

deste tipo de elementos (Marques da Silva e Gosselin, 2005). Estes factos tornam a tentativa de avaliação do desempenho desta tecnologia, bem como as tentativas de formular projectos para aplicação em casos reais num desafio bastante complexo (Roth et al, 2007).

Vários trabalhos foram realizados para a compreensão da complexidade do funcionamento do conceito da DSF (como o realizado por Saelens, 2002, entre outros), e os resultados obtidos permitiram a determinação de modelos numéricos, necessárias para a correcta simulação das fachadas, a partir de bases de dados experimentais. Estas informações permitem avaliar as capacidades das ferramentas numéricas existentes para avaliação do comportamento térmico de edifícios, permitindo identificar as limitações desses softwares em simular correctamente fachadas de dupla pele (Jensen et al, 2008).

Por outro lado, diversos esforços foram já feitos para obter uma modulação/simulação aceitável utilizando os presentes softwares disponíveis para simulação térmica de edifícios, bem como outros mais apropriados para simulação de componentes individuais (e não para avaliação térmica de todo um edifício). Para atingir resultados aceitáveis (tendo em conta o software aplicado) é requerido que o utilizador possua uma forte base de conhecimento em física e termodinâmica, experiência em modulação e conhecimento das possibilidades e limitações do software utilizado (Poirazis, 2006). Diversos programas foram já ensaiados para simulação de DSF's pelo Belgian Building Research Institute em Dezembro de 2004. Um relatório final foi formulado (Flamant et al, 2004), onde se pode encontrar informação acerca da aplicabilidade de uma série de softwares genéricos acessíveis ao público que podem ser utilizados para simulação de fachadas ventiladas de dupla pele, embora este nunca tenha sido o objectivo destes mesmo programas informáticos. É também disponibilizada informação detalhada sobre procedimentos de modelação utilizando outros softwares que não os apresentados nesse relatório, onde os autores sugerem algumas abordagens para a modelação de fachadas, bem como alertando o utilizador para algumas possíveis limitações do software. Segundo este relatório, para criar um modelo viável e sujeito aos processos físicos correctos, são necessários quatro grupos de parâmetros que precisam de ser correctamente introduzidos:

- Clima externo;
- Modelo da DSF (propriedades dos envidraçados e da caixilharia, características do sombreamento, caudal de ar interno da DSF, entre outros);

- Modelo do edifício (interacção entre a DSF e os sistemas de climatização do edifício, quando aplicável);
- Estratégias de controlo.

Outros dois factores são essenciais para uma correcta obtenção de dados sobre o funcionamento de uma DSF (Flamant et al, 2004):

- Processos de transferência de calor através dos elementos de sombreamento e dos panos envidraçados;
- Caudal de ar na cavidade interna devido aos efeitos de convecção natural e influência do vento.

Os próximos capítulos descrevem a validação de uma ferramenta de simulação térmica de edifícios, o *EnergyPlus* (E+), onde é modulada uma pequena instalação experimental de uma DSF em regime de ventilação natural montada no Laboratório Nacional de Engenharia de Lisboa. É utilizado também um interface comercial para o E+, o *DesignBuilder* (DB). Posteriormente são comparados os dados fornecidos experimentalmente com os resultados obtidos através das simulações. Com este trabalho é também demonstrado que não só é necessário uma ferramenta numérica robusta, como também é imprescindível a necessidade de introduzir os dados correctos no programa e uma sólida base de dados obtidos através de ensaios práticos para posterior validação.

3.1. Softwares: EnergyPlus e DesignBuilder

O *EnergyPlus* é uma ferramenta de avaliação do desempenho térmico de edifícios concebido para modelar o aquecimento, arrefecimento, iluminação, ventilação e consumos energéticos globais. Este software não possui um interface de fácil utilização. Foi criado com o objectivo de tornar disponível á comunidade científica uma forte base de cálculo que seja adaptável a interfaces desenvolvidos por terceiros. Estes softwares integrados terão por sua

vez os seus próprios objectivos específicos, e cujos princípios de cálculo se baseiam no software E+.

Para ventilação mecânica, utiliza um método de simulação de janelas que permite ao utilizador especificar o caudal de ar que atravessa a cavidade existente entre dois panos de envidraçado, bem como a origem e o destino deste caudal (modo de ventilação). Para ventilação natural, e como o programa cria zonas diferenciadas que considera como volumes de controlo, é necessário criar uma zona independente para a cavidade interna da DSF para que deste modo seja possível definir e simular o caudal de ar que a atravessa (definido pelo efeito de convecção natural, efeitos de diferenciais de pressão devido ao vento e coeficientes de descarga das aberturas de ventilação).

A radiação solar é dividida em três parcelas: radiação directa, difusa e reflectida. Os valores de radiação global são incluídos na base de dados climatéricos para cada local específico. Para radiação solar directa, é tomada em conta a intensidade segundo um plano perpendicular aos raios solares para cada hora, bem como o ângulo de incidência solar.

É possível determinar para os envidraçados as suas características ópticas para comprimentos de onda específicos, nomeadamente: transmissividade e reflectividade solar, visível e infra-vermelha. Estas possibilidades são bastantes úteis para a simulação da DSF em regime de ventilação natural, já que o efeito da radiação solar é muito importante para determinar o desempenho deste tipo de fachadas.

A transferência global de energia através de uma superfície em contacto com o exterior tem em conta os efeitos de radiação solar mencionados, bem como a as trocas de energia por radiação entre a superfície e o ambiente (radiações de longos comprimentos de onda), por convecção com o ar exterior e por condução através da superfície (figura 20). Permite igualmente definir os métodos de determinação dos coeficientes de convecção através de algoritmos pré-estabelecidos.

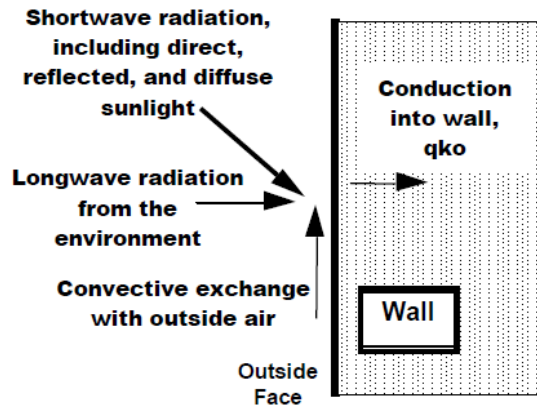


Figura 20 – Volume de controlo para o balanço energético entre uma superfície e o exterior (EnergyPlus, 2009).

Para o balanço energético entre uma superfície e o ambiente interior do espaço, o programa entra em conta com quatro componentes: (1) condução através do elemento de fronteira; (2) convecção com o ar interior; (3) absorvidade e reflectividade de radiação de curtos comprimentos de onda (radiação solar transmitida para dentro da zona e radiação de fontes luminosas interiores) e (4) intercâmbio de radiação de longos comprimentos de onda (com outras superfícies da zona, equipamentos e ocupação) (figura 21). Também aqui é possível definir métodos de cálculo dos coeficientes de convecção.

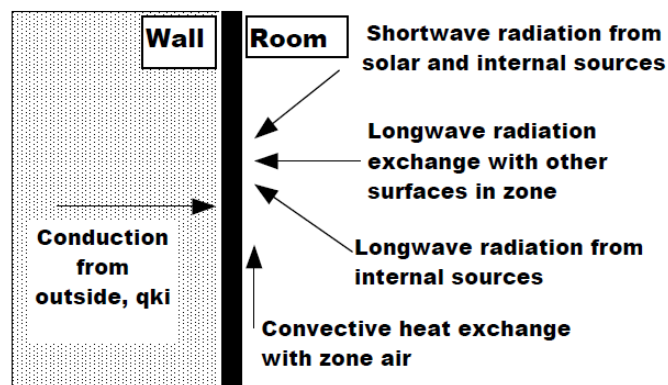


Figura 21 - Volume de controlo para o balanço energético entre uma superfície e o interior (EnergyPlus, 2009).

A vantagem em simular uma DSF no *EnergyPlus* consiste no grande nível de detalhe que é possível aplicar ao modelo criado e a possibilidade de simular o seu funcionamento conjuntamente com o comportamento térmico do restante edifício, possibilitando assim: (1)

estabelecer a sua influência no sistema de ventilação e ar condicionado instalado no edifício;
(2) avaliar o impacto desta tecnologia nos consumos energéticos globais do mesmo.

As maiores desvantagens em utilizar esta ferramenta numérica incluem a quantidade de tempo e esforço necessários para criar o modelo da DSF e o facto de não existir ainda uma validação da capacidade de simulação desta tecnologia. Outros pormenores verificados durante a modelação impõem dificuldades em criar um modelo próximo do pretendido. Estas desvantagens são tratadas mais á frente na presente tese.

Para elaboração deste trabalho foi utilizado um outro software, o *DesignBuilder* (figura 22). Trata-se de um ambiente *user-friendly* criado para o E+, permitindo facilmente a modelação de edifícios e a sua avaliação em termos de comportamento térmico, de acordo com as possibilidades oferecidas pelo *EnergyPlus*. A utilização deste software permite uma rápida modelação do edifício e da fachada, e maior facilidade em manipulação dos dados e visualização dos resultados obtidos em simulação.

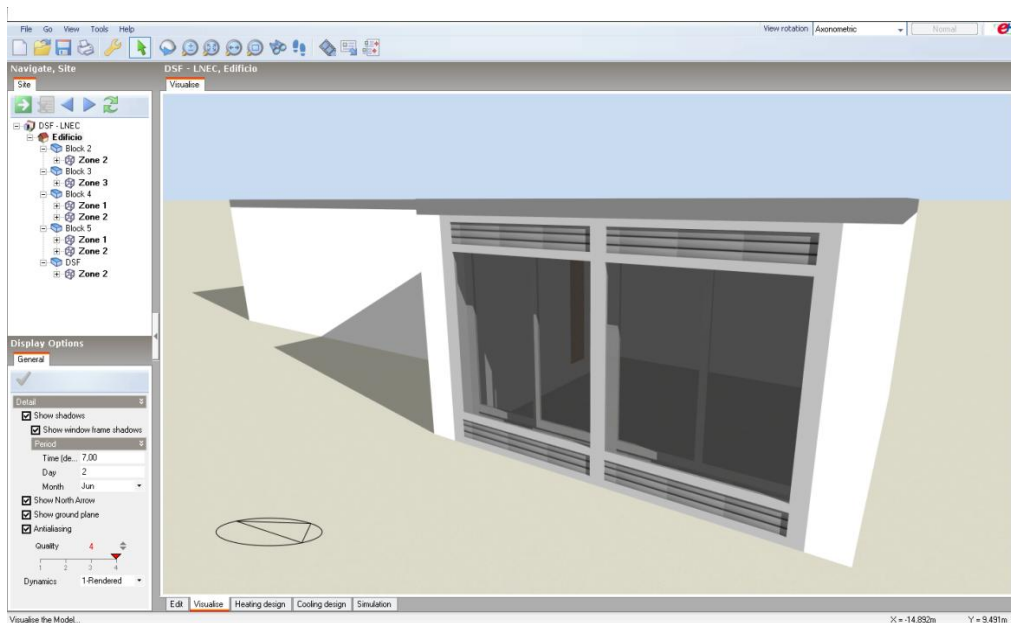


Figura 22 – Interface do *DesignBuilder*.

3.2. Descrição Geral da Instalação

Na primavera de 2008 foi efectuada uma campanha de medidas sobre o comportamento térmico de uma fachada de dupla pele montada numa célula de teste nas instalações do LNEC (figura 23). A fachada opera somente por ventilação natural, e possui a capacidade para funcionar sob diversas configurações e modos de ventilação, tendo sido utilizadas as seguintes:

- Tampão;
- Fluxo Exterior;
- Fluxo de Exaustão;
- Fluxo de Insuflação.

A DSF possui dois envidraçados principais simples no pano exterior e dois envidraçados duplos no pano interior. As grelhas de passagem de ar estão situadas por cima e por baixo dos panos, perfazendo um total de quatro grelhas para cada um destes. Esta construção da fachada permite facilmente a sua preparação para funcionamento de acordo com os modos descritos anteriormente.



a



b

Figura 23 – DSF instalada no LNEC: Vista da fachada no exterior – a); Interior da fachada com vista do exterior do edifício – b).

Em todas as configurações foi utilizado um sistema de sombreamento de persianas com lâminas orientáveis. Os ensaios decorreram com várias configurações deste elemento de sombra para cada modo de funcionamento da fachada, variando a abertura da persiana em si em três posições: (1) a cobrir totalmente os envidraçados, (2) a meio destes e (3) completamente recolhidas. Dentro das configurações do sombreamento, foi também sistematicamente modificada a posição das lâminas (em 0°, 45° e 90°). A construção pormenorizada da fachada e as propriedades dos seus elementos constituintes será tratada mais á frente no presente trabalho.

De momento está disponível uma base de dados experimentais para estes diferentes modos de funcionamento (Duarte, 2009) No entanto, neste trabalho, apenas é considerada a configuração de fluxo exterior, com o sombreamento na posição inferior (cobrindo a totalidade do envidraçado) e lâminas a 45°. Neste modo de operação, as grelhas interiores encontram-se totalmente fechadas e as exteriores abertas de modo a permitir a entrada e saída de ar exterior pelo canal interno da DSF. O ar entra pela grelha inferior, aquece na passagem pelo interior da cavidade e sai pelas grelhas superiores retirando alguma carga térmica que atravessa a fachada, tudo potenciado apenas por ventilação natural. O tratamento dos dados obtidos nesta configuração é feito no capítulo 4 da presente tese.

3.3. Criação do Modelo da DSF

O modelo para simulação da fachada foi criado no ambiente *DesignBuilder* (figura 22). A modelação foi efectuada segundo os dados da geometria da instalação e das propriedades térmicas dos elementos de construção que foram providenciados pelo LNEC. O modelo é constituído por três zonas principais (figura 24):

- Zona 1 - Fachada de dupla pele;
- Zona 2 - Sala interior da DSF;
- Zona 3 - Corredor de acesso.

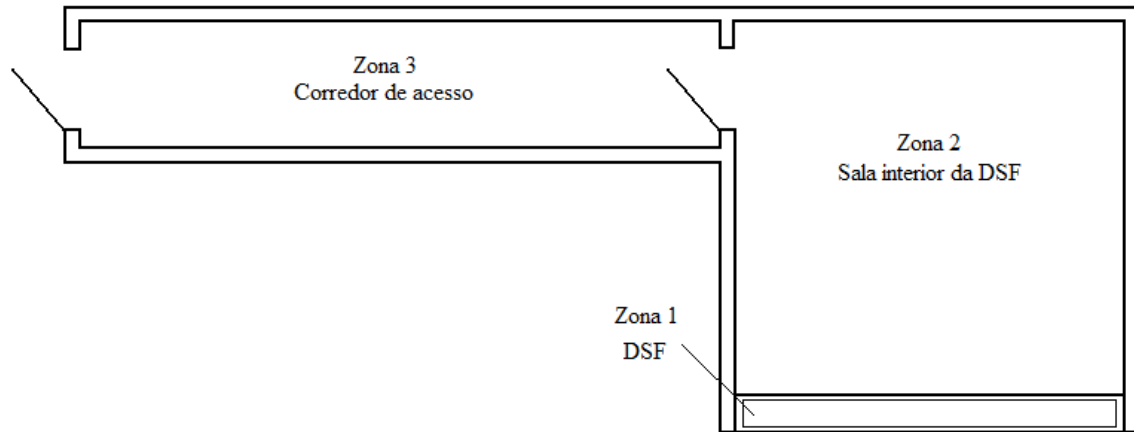


Figura 24 – Zoneamento da Instalação.

Como o *EnergyPlus* não possui um modelo interno especificamente criado para modelação de uma unidade DSF, é necessário criar uma zona independente (zona 1) para a própria fachada de modo a se obterem resultados do comportamento térmico do canal interno. As dimensões internas do canal são: 3,4m de comprimento, 0,185m de largura e 2,29m de altura. A zona 2 (dimensões externas: 4,1x4,3x2,4m³) corresponde ao espaço interior onde se encontra a fachada, e os resultados obtidos pela simulação permitem verificar a capacidade do software em modelar as condições de conforto adquiridas pelo funcionamento de uma DSF. A zona 3 (dimensões externas: 3x8x2,5m³) é um corredor de acesso á zona 2, cuja importância de modelação se prende apenas ao facto do possível sombreamento exterior que pode causar á sala interna, podendo influenciar os resultados obtidos. A fachada encontra-se orientada a Sudeste, mais precisamente a 160° segundo o sentido directo.

Considerações Gerais

Para modelação do espaço interno da fachada como uma zona independente é possível tomar três caminhos: (1) criar um bloco geral que englobe tanto o espaço interior da sala como a DSF, e posteriormente criar uma partição interna cuja divisória corresponderá ao pano interno da fachada, criando assim duas zonas independentes dentro do mesmo bloco; (2) modelar um bloco que corresponderá apenas á área interior da zona 2 e um bloco totalmente distinto para a zona onde se encontra a fachada; (3) utilizar uma modelação predefinida de

cavidades ventiladas disponíveis no *EnergyPlus* designada de *Exterior Naturally Vented Cavity* (ENVC).

O primeiro caso impõe algumas problemáticas que foram analisadas. Ao criar um bloco geral para ambas as zonas 1 e 2, a parede externa que corresponde á parte frontal da fachada é definida com as características gerais da parede de que o bloco é constituído. Isto impossibilita uma definição pormenorizada dos materiais e do modo de construção da DSF, pelo que não foi tomada esta abordagem.

A segunda opção (criar uma zona independente para a fachada) pode ser tomada com maior ou menor detalhe. Foram feitas duas modelações distintas utilizando este modo.

O primeiro caminho tomado foi criar um bloco único e independente na fachada do edifício que corresponde á DSF. Os envidraçados e as grelhas de ar foram colocados nas paredes interiores e exteriores do bloco de modo a criar os dois panos da fachada. Todo o bloco foi definido como sendo construído a partir do alumínio da caixilharia e a espessura da parede estabelecida de acordo com a espessura do suporte da fachada (5cm). Um outro pormenor foi a criação de outros dois blocos laterais que simulam a existência de parede ao lado da fachada (figura 25).

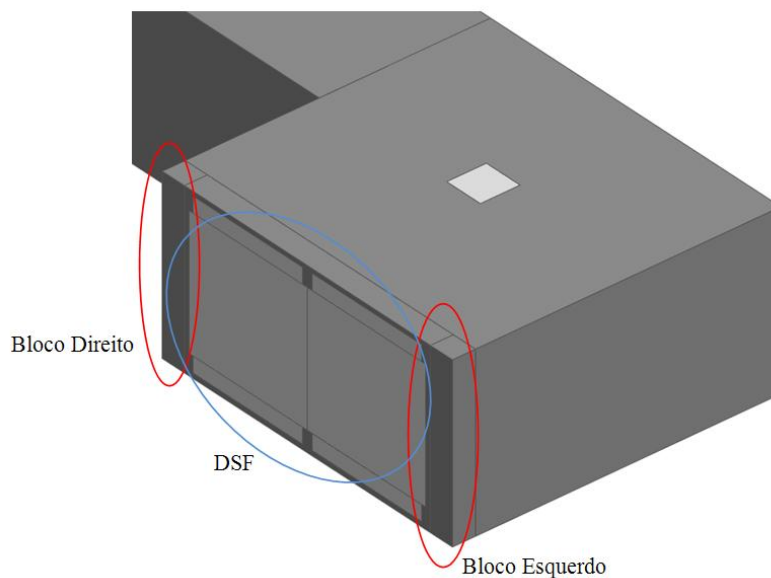


Figura 25 – Modelação da DSF.

Os blocos esquerdo e direito foram preenchidos com uma partição com o mesmo material das paredes de modo a simular o melhor possível a continuação das mesmas nessas zonas. A figura 26 representa uma vista em maior detalhe da zona criada para simulação da construção da fachada.

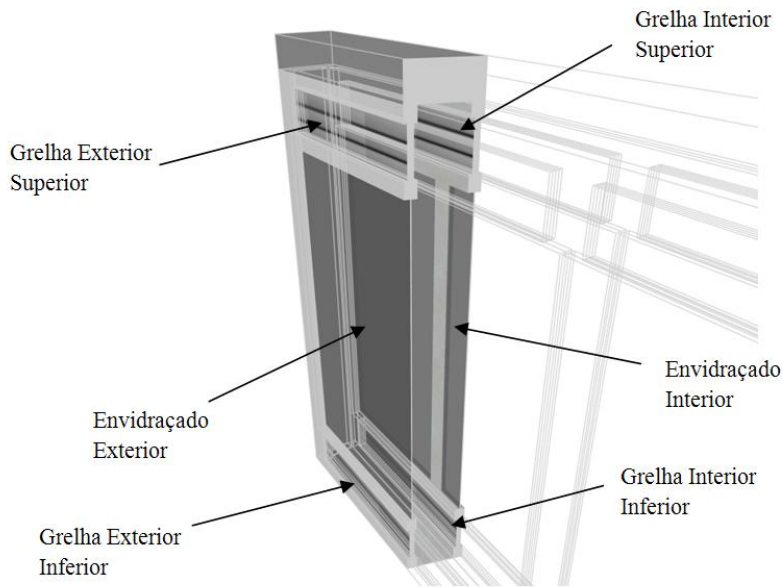


Figura 26 – Vista em corte da DSF da modelação simplificada.

Uma abordagem mais pormenorizada com base nesta modelação foi também considerada. A razão para tal é simples: as grelhas de ar são definidas para cada parede de um bloco. Tendo em conta a modelação explicada anteriormente, as quatro grelhas exteriores possuem as mesmas características em termos de coeficientes de descarga e coeficientes de pressão do vento, o que não acontece na realidade (principalmente na questão dos coeficientes de pressão). O mesmo pode ser dito para as grelhas interiores, embora neste caso os coeficientes de pressão do vento não são tidos em conta por se encontrarem fechadas durante a simulação. Para ser possível especificar individualmente estes parâmetros para cada grelha a zona correspondente á DSF é dividida em três blocos independentes: um bloco inferior que corresponde às grelhas inferiores (figura 27-a), um bloco intermédio para os envidraçados (figura 27-b) e um bloco superior para as grelhas superiores (figura 27-c). Os blocos das grelhas são divididos a meio por uma partição fictícia de modo a criar uma zona individual

para cada grelha. No total, o bloco da fachada original passa a estar dividido em cinco zonas distintas.

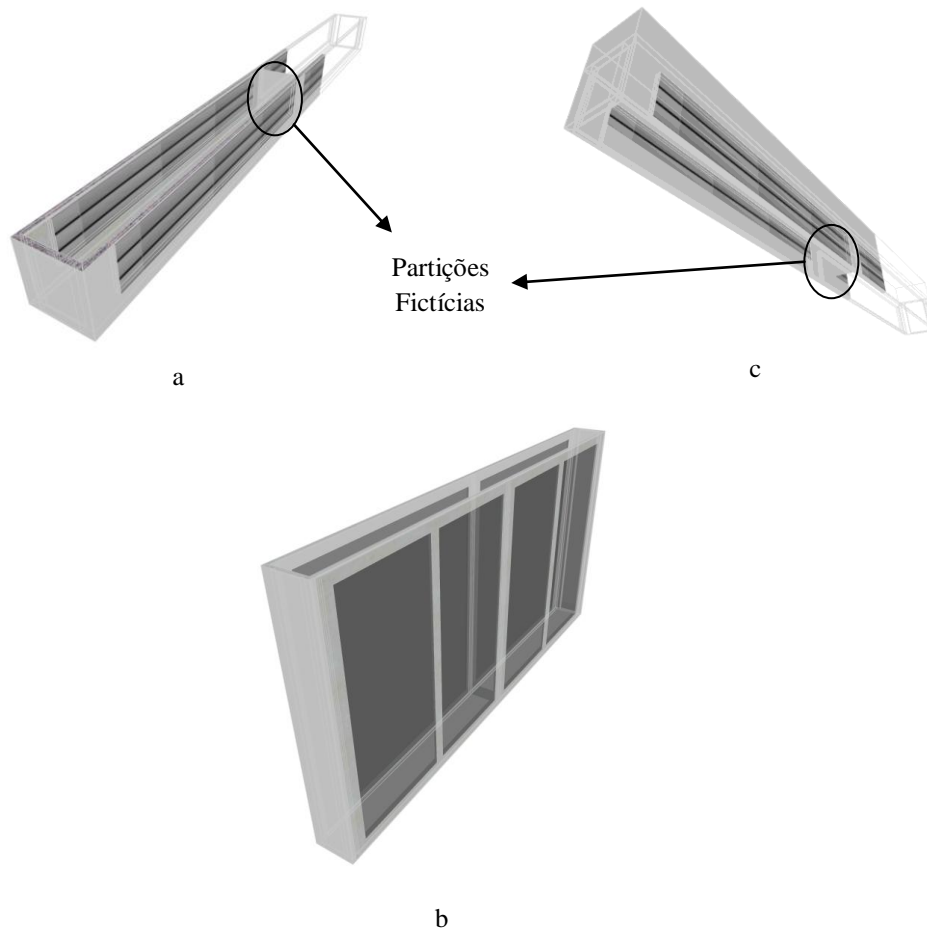


Figura 27 – Divisão da fachada no modelo detalhado: grelhas inferiores – a); envidraçados – b); grelhas superiores – c).

Como o software considera cada uma destas zonas como um caso de um espaço normal de um edifício, define para todas elas a existência de coberturas e pavimentos. Para modelar o melhor possível a fachada é necessário “eliminar” a existência destas divisões. Para tal, são criadas aberturas nestas superfícies que cobrem a totalidade da sua área, de modo a permitir a livre passagem de ar entre as zonas das grelhas e a zona central.

Deste modo existem duas modelações distintas: um bloco único para toda a fachada (designado de modelo simplificado) e uma segunda modelação onde este bloco se encontra dividido de modo a individualizar cada grelha e a zona central dos envidraçados (modelo

detalhado). A simulação será efectuada para ambos estes modos de modulação com o objectivo de avaliar a divergência de resultados para diferentes graus de detalhe.

A terceira possibilidade é utilizar uma característica inerente apenas ao *EnergyPlus* designada de *Exterior Naturally Vented Cavity*. Esta opção não se encontra disponível no *DesignBuilder*, pelo que para a sua aplicação é necessário criar uma versão da modulação do edifício no DB e exportar para um ficheiro .idf, onde posteriormente é possível aplicar alterações directamente em ambiente E+, nomeadamente a aplicação de uma ENVC. Este elemento de modulação consiste na criação de uma cavidade ventilada naturalmente situada entre duas superfícies e posteriormente simula o seu comportamento em termos de transferência de energia térmica entre elas. No entanto existem diversas limitações:

- O pano exterior da cavidade é considerado como sendo opaco á radiação de curtos e longos comprimentos de onda. Dito isto, o software automaticamente reconhece a sua transmissividade como sendo zero, necessitando apenas de valores de emissividade térmica (infra-vermelhos) e absorvidade solar.
- Neste modelo não existem referências a propriedades de transferência de calor, nomeadamente coeficientes de condução térmica dos materiais constituintes dos panos.
- Tendo em conta os pontos anteriores, não é possível modelar com pormenor uma fachada constituída por envidraçados e elementos de caixilharia;
- A quantidade de radiação solar não é transmitida para o interior do espaço onde a cavidade se encontra montada (dado que os panos são considerados como opacos). Isto implica que a fachada receba uma quantidade excessiva de energia térmica comparativamente ao que é esperado já que toda a parcela de radiação solar é recebida pela fachada, e retirada por convecção com o ar de passagem e por convecção, condução e emissividade para o interior/exterior da zona através dos elementos de construção.
- O coeficiente de convecção interna do canal da cavidade (aplicado ás superfícies de ambos os panos em contacto com o canal) é calculado segundo a norma ISO 15099. Este método de cálculo é estabelecido para janelas de duplo envidraçado com espaços de ar não ventilados e de pequena espessura (ver capítulo 4.2.2, algoritmo *Trombe Wall*).

Pelas razões apresentadas, este modelo não foi obviamente utilizado neste trabalho para modelação da fachada.

No anexo que acompanha este trabalho estão incluídas as informações relativas aos pormenores da fachada comuns aos dois modelos referenciados anteriormente, nomeadamente propriedades geométricas, térmicas e ópticas incluídas nas modelações.

4. Simulações e Resultados

No presente capítulo serão tratados todos os aspectos relacionados directamente com a simulação dos modelos criados no capítulo 3, e para validação serão utilizados os dados obtidos durante as monitorizações efectuadas á fachada no período de 23 a 28 de Abril. Durante este período a DSF foi testada em condições de fluxo exterior com sombreamento na posição inferior.

Relativamente à simulação é feita em primeiro lugar uma abordagem às condições externas verificadas durante o período em causa, e a adaptação destes dados ao software. De seguida é feito um resumo dos algoritmos de convecção externa e interna disponíveis no ambiente E+ de modo a justificar a escolha para a simulação. Posteriormente é feita uma abordagem resumida ao modelo de cálculo de ventilação natural e infiltração de ar utilizado (*Airflow Network*) para determinar o fluxo de ar dentro da fachada, bem como alguns parâmetros deste modelo para a simulação térmica. Por último são apresentados os resultados da simulação, onde se comparam valores de variáveis como temperaturas internas do canal e o caudal de ar dentro da fachada de ambos os modelos com os correspondentes valores registados na monitorização.

4.1. Condições Externas

A primeira etapa para a correcta simulação do modelo da fachada, criado segundo a descrição apresentada no capítulo 3, consiste no tratamento dos dados correspondentes às condições climáticas observadas e registadas durante a monitorização do funcionamento da DSF. O objectivo é introduzir estes dados no ficheiro que o software utiliza como fonte de informação das condições exteriores do local onde o edifício modelado se encontra.

O software E+ designa este tipo de ficheiro de EPW (*EnergyPlus Weather*), que contém uma lista de parâmetros climáticos utilizados durante as simulações térmicas, em valores médios horários, num formato de texto simples, tendo em vista uma melhor acessibilidade aos dados por parte dos utilizadores. É assim possível converter este ficheiro para um outro no formato CSV (*comma separated values*), alterar os dados nele contidos e

por fim reverter para o formato EPW utilizado pelo E+. São várias as informações contidas neste ficheiro (principalmente no que respeita a diversas formas e fontes de radiação térmica), mas no entanto só algumas são utilizadas directamente pelo software para efeitos de cálculo, nomeadamente:

- Temperatura seca (°C);
- Humidade relativa (%);
- Pressão atmosférica (Pa);
- Radiação infra-vermelha horizontal (W/m^2);
- Radiação directa normal (W/m^2);
- Radiação difusa horizontal (W/m^2);
- Direcção do vento (°);
- Velocidade do vento (m/s);
- Cobertura total do céu;
- Cobertura opaca do céu.

A radiação infra-vermelha horizontal refere-se á intensidade térmica que incide num plano horizontal segundo as ondas electromagnéticas deste mesmo espectro. Se este valor não se encontrar disponível no ficheiro EPW na altura da simulação, é calculado com base nos dados sobre a cobertura do céu. Sobre esta última, são disponibilizados dois campos para definir a sua quantidade para cada hora, a total e a opaca. Ambos os campos referem-se a uma escala de 0 a 10, correspondendo 0 a um céu totalmente limpo e 10 a totalmente coberto. O propósito da informação da cobertura é única e exclusivamente calcular a radiação infra-vermelha horizontal. O reflexo deste parâmetro em todas outras radiações indicadas pelo ficheiro *weather* está implícito nos seus valores.

A radiação directa normal indica a intensidade de energia térmica transmitida por radiação solar recebida num plano perpendicular á direcção dos raios solares a cada hora. A radiação difusa é a quantidade de radiação que é transmitida indirectamente no espectro solar (incluindo assim a radiação visível e excluindo a radiação directa solar).

Para elaboração da base de dados climáticos a ser utilizada para a simulação da fachada, foi tomado como base o ficheiro EPW disponibilizado pelo ambiente E+ correspondente a dados fornecidos pelo INETI (Instituto Nacional de Engenharia, Tecnologia e Inovação), a partir de dados climáticos publicados pelo Instituto de Meteorologia entre 1951 e 1980, em combinação com dados próprios disponibilizados pelo INETI. Este ficheiro possui toda a informação acima descrita numa base horária para um ano típico em Lisboa.

Os dados experimentais disponíveis são diversos, correspondendo a várias configurações da fachada. No entanto, para validação dos resultados, como já foi indicado, será utilizada apenas a configuração de fluxo externo, correspondendo aos dias 2 a 4 de Junho de 2008. Estes dados estão disponíveis em intervalos de 10 minutos, mas como o ficheiro EPW recorre a valores horários, foram calculadas as respectivas médias horárias.

4.1.1. Temperatura Seca e Humidade Relativa

Dado que só é possível dispor dos valores observados para temperatura seca não seria indicado simplesmente incluir estes valores na simulação, pois a humidade relativa utilizada é estabelecida para as temperaturas desses mesmos dias segundo os dados do ficheiro EPW. Para resolver este contratempo, uma possível solução seria utilizar humidades relativas de outros dias incluídos no ficheiro *weather* cujas temperaturas secas se aproximassem o melhor possível às temperaturas correspondentes aos valores observados durante o funcionamento da fachada. No entanto, isto provou-se ser uma tarefa extremamente difícil devido às grandes amplitudes térmicas diárias observadas de 23 a 28 de Abril. Não foi identificada qualquer possibilidade de aproximação de valores entre temperaturas secas, pelo que, por defeito, foram utilizadas as humidades relativas incluídas no ficheiro EPW para o período em causa. O gráfico da figura 28 demonstra a relação entre a temperatura seca observada nos dias em questão e os valores de humidade relativa desses mesmos dias.

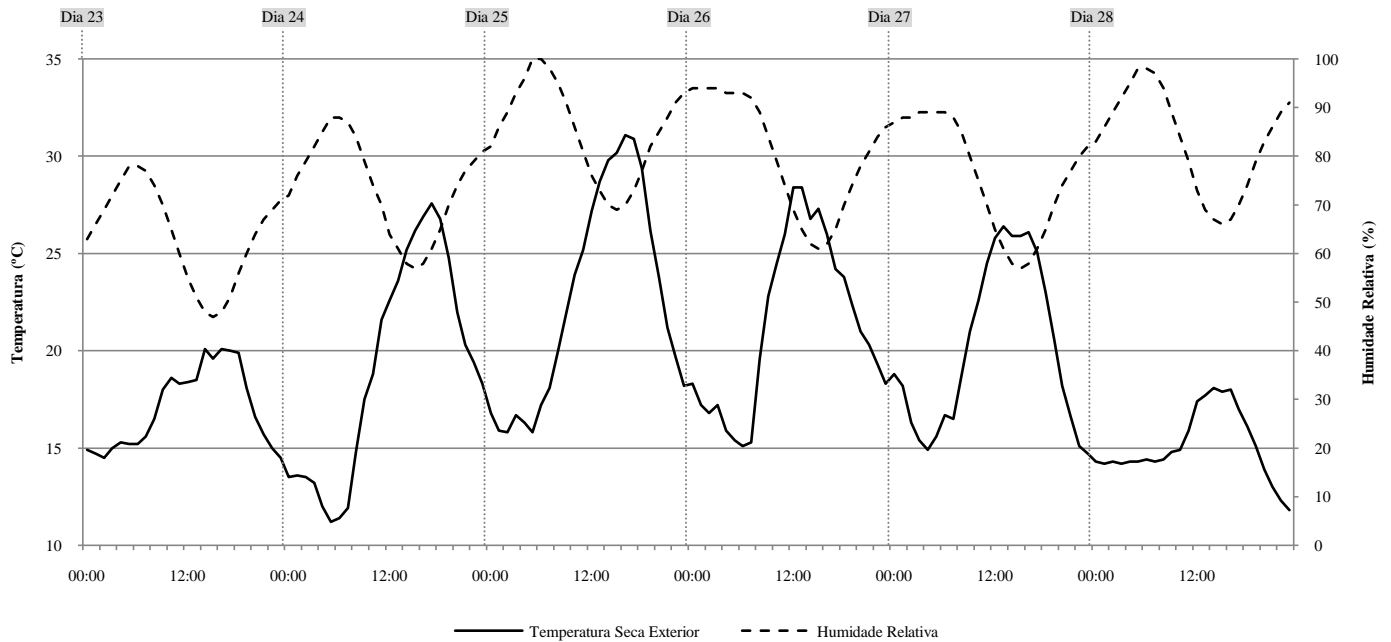


Figura 28 – Temperatura seca exterior observada durante o funcionamento da fachada e humidade relativa do ficheiro EPW para o mesmo período.

4.1.2. Radiação Solar

Os valores disponíveis de radiação solar correspondem às intensidades de incidência directa nas componentes vertical e horizontal expressas em W/m^2 . Como o ficheiro EPW tem em conta a incidência solar perpendicular a um plano para cada hora, para incluir os dados climáticos reais no ficheiro EPW foi necessário determinar a radiação directa normal tendo em conta as componentes verticais e horizontais disponíveis. Para isto foi utilizado uma simples relação matemática:

$$R_n = \sqrt{R_h^2 + R_v^2} \tag{11}$$

Onde:

- R_n = Radiação directa normal (W/m^2)
- R_h = Componente horizontal de radiação solar ($W m^{-1} K^{-1}$)
- R_v = Componente vertical de radiação solar ($W m^{-1} K^{-1}$)

Paralelamente são introduzidos também os valores da radiação difusa medidos durante o mesmo período. A figura 29 representa os valores de radiação a serem utilizados durante a simulação da fachada.

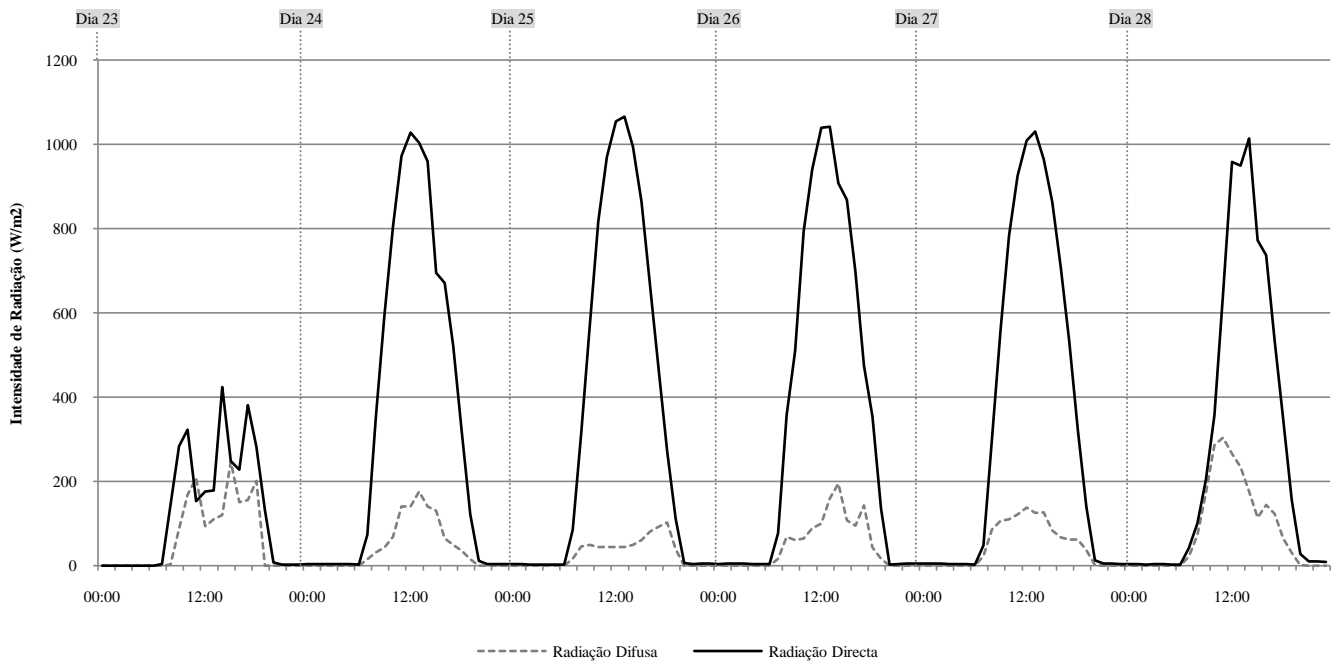


Figura 29 – Radiação directa normal e radiação difusa durante o período de funcionamento da fachada.

Pela observação dos valores apresentados no gráfico da figura 29, é possível verificar que durante o primeiro dia de experimentação se observaram períodos de céu encoberto, causando as irregularidades apresentadas nos valores de radiação. Como foi já referido, a ocorrência de nuvens e outros fenómenos idênticos influencia directamente estes valores, pelo que os dados contidos no ficheiro EPW relativamente á cobertura opaca e total não são tidos em conta para a determinação da intensidade de radiação solar.

4.1.3. Velocidade e Direcção do Vento

Como referido, os valores de caudal de ar de uma fachada que funcione em regime de ventilação natural dependem essencialmente do efeito térmico e das diferenças de pressão devido ao vento. Por esta razão é de extrema importância incutir no ficheiro EPW as velocidades e direcções do vento durante o período em que decorreu o ensaio da DSF. Juntamente com estes dados é necessário incluir os valores dos coeficientes de pressão na posição das grelhas, que expressam a acção do vento sobre a fachada frontal, definidos como o rácio entre pressão relativa local e a pressão dinâmica (também providenciados por ensaios efectuados no LNEC). Na figura 30 estão representados os valores observados de velocidade e direcção do vento, registados por um conjunto de anemómetro e cata-vento, colocados a 6 metros acima do nível do solo, nas imediações da célula de teste.

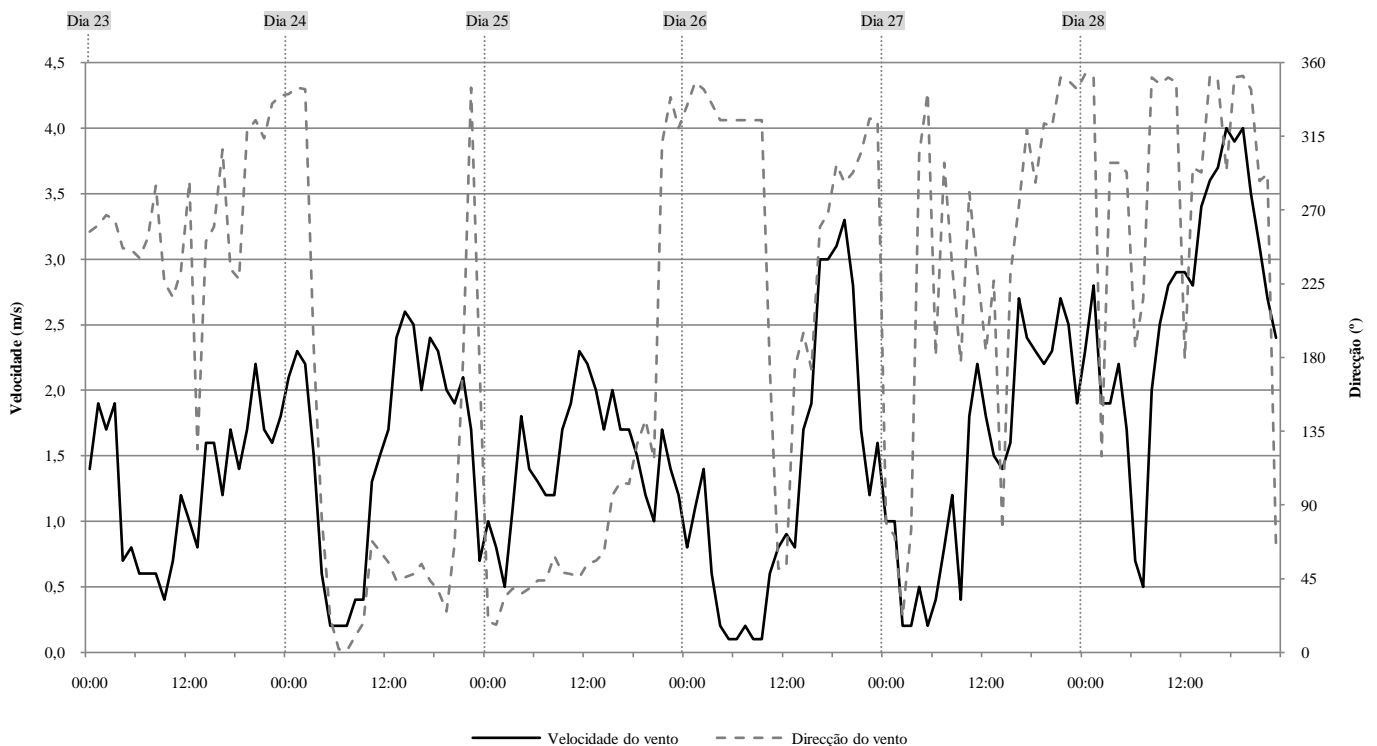


Figura 30 – Velocidade e direcção do vento durante o período de funcionamento da fachada.

Os dados dos coeficientes de pressão do vento para cada grelha da fachada apresentam-se na tabela 1. A posição das grelhas referenciadas nesta tabela dizem respeito á

vista exterior e os ângulos indicados são relativos á fachada, onde 0° corresponde á componente normal á superfície.

Tabela 1 – Coeficientes de pressão do vento para cada grelha (modelo detalhado).

Posição	Grelha Superior Direita	Grelha Superior Esquerda	Grelha Inferior Direita	Grelha Inferior Esquerda
0° (SE)	0,06	0,05	0,10	0,06
45° (S)	-0,01	-0,02	0	-0,03
90° (SW)	-0,03	-0,02	-0,06	-0,09
135° (W)	-0,05	-0,12	-0,07	-0,14
180° (NW)	-0,08	-0,15	-0,03	-0,05
225° (N)	0,01	-0,02	0,05	0,05
270° (NE)	-0,24	-0,21	-0,19	-0,05
315° (E)	-0,35	-0,33	-0,28	-0,15

Estes dados são introduzidos na modelação detalhada. O zonamento diferenciado para cada grelha permite indicar para cada uma quais os coeficientes de pressão do vento que as afectam. No caso da modelação simplificada, onde a fachada é definida apenas como uma zona global, só é possível indicar um conjunto de valores para toda a superfície externa. Deste modo, foi considerado as médias dos valores apresentados na tabela 1 e que estão indicados na tabela 2.

Tabela 2 – Coeficientes de pressão do vento para a superfície externa da fachada (modelo simplificado).

Posição	Valores Médios
0° (SE)	0,07
45° (S)	-0,02
90° (SW)	-0,05
135° (W)	-0,10
180° (NW)	-0,08
225° (N)	0,02
270° (NE)	-0,17
315° (E)	-0,28

4.2. Algoritmos de Convecção

Como foi indicado na introdução aos softwares no capítulo 3, o *EnergyPlus* tem disponível diversos algoritmos para cálculo dos coeficientes de convecção h das superfícies dos espaços, tanto para zonas interiores como exteriores. Vários trabalhos foram já desenvolvidos para determinar quais os melhores métodos de cálculo dos algoritmos de convecção, como o de Saelens, 2002. No entanto, o E+ não permite ao utilizador definir o método de cálculo destes coeficientes livremente, disponibilizando apenas para escolha alguns algoritmos.

Os próximos subcapítulos descrevem sucintamente estes métodos de cálculo e os princípios em que se baseiam para que seja possível a justificação da escolha dos mais indicados para a simulação da DSF.

4.2.1. Convecção Externa

Para determinação de coeficientes de convecção de superfícies em contacto com o ambiente exterior ao edifício, o software possibilita a escolha entre os seguintes métodos de cálculo: algoritmo simples, detalhado, BLAST, TARP, MoWiTT e DOE-2.

- Algoritmo Simples

Este algoritmo baseia-se essencialmente nas velocidades do vento relativamente á superfície em questão e nos valores de rugosidade da mesma. A equação utilizada é a seguinte:

$$h_e = D + EV_z + FV_z^2 \quad (12)$$

Onde:

h_e = Coeficiente de convecção externa ($W m^{-2} K^{-1}$)

V_z = Velocidade do vento (m/s)

D, E, F = Coeficientes de rugosidade do material ($W m^{-1} K^{-1}$)

Os coeficientes D , E e F são baseados nas correlações apresentadas na figura 1 da página 25.1 do manual da ASHRAE (ASHRAE, 2001). Estas correlações baseiam-se na relação entre a velocidade do vento com o valor de condutividade superficial que se verifica entre a superfície e as primeiras camadas de ar em contacto com a mesma para diversos tipos de materiais com diferentes rugosidades. Por observação da equação, rapidamente se conclui que estes coeficientes não podem ser considerados adimensionais de modo que as unidades sejam coerentes. No entanto, eles são de facto determinados apenas segundo métodos empíricos.

- Algoritmo Detalhado, BLAST e TARP

Os algoritmos BLAST e TARP são muito baseados nos princípios descritos no algoritmo detalhado, pelo que serão tratados como um só. A determinação do coeficiente de convecção externa passa pela distinção entre as duas componentes de convecção térmica: a componente natural e a forçada:

$$h_e = h_f + h_n \quad (13)$$

Onde:

h_e = Coeficiente de convecção externa ($W m^{-2} K^{-1}$)

h_f = Componente de convecção forçada ($W m^{-2} K^{-1}$)

h_n = Componente de convecção natural ($W m^{-2} K^{-1}$)

A componente de convecção forçada é baseada em correlações empíricas, e a sua determinação é efectuada através da seguinte expressão:

$$h_f = 2,537 \cdot W_f \cdot R_f \left(\frac{PV_z}{A} \right)^{1/2} \quad (14)$$

Onde:

h_f = Componente de convecção forçada ($\text{W m}^{-2} \text{K}^{-1}$)

W_f = Constante de incidência do vento

R_f = Coeficiente de rugosidade superficial

A constante de incidência W_f respeita á orientação do vento relativamente á superfície externa considerada, havendo aqui a distinção entre duas situações: a incidência do vento na superfície (tomando o valor de 1,0) ou o caso onde o vento não incide directamente na mesma (sendo então considerado como 0,5). O coeficiente de rugosidade R_f é definido baseando-se na mesma informação que é indicada no algoritmo simples.

Para a componente natural da convecção externa, é correlacionada a inclinação da superfície e o diferencial de temperatura entre esta e o ar. Estas correlações são baseadas nas equações apresentadas pela ASHRAE (página 3.12, tabela 5, equações 9 e 11) (ASHRAE, 2001) para regimes turbulentos do ar, em placas verticais e em placas horizontais de grandes dimensões com o ar a deslocar-se no sentido ascendente quando aquecido e descendente quando arrefecido. Caso o contrário se verifique (o ar a deslocar-se no sentido descendente quando aquecido e o no sentido ascendente quando arrefecido) é tido em conta a equação 12 da mesma fonte. Estas equações são baseadas nos princípios descritos no capítulo 2.2.2.1 do presente trabalho. O software considera algumas alterações a estas equações de modo a incluírem a inclinação da superfície. Para o caso da fachada de dupla pele, seria utilizada a equação correspondente às placas verticais:

$$h_n = 1,31 |\Delta T|^{1/3} \quad (15)$$

Onde:

h_n = Componente de convecção natural ($W m^{-2} K^{-1}$)

ΔT = Temperatura da superfície – Temperatura do ar (K)

As outras equações não são aqui descritas já que tratam de placas em posições horizontais ou com outras inclinações que não a vertical.

As diferenças entre os algoritmos BLAST e TARP relativamente ao método descrito são muito poucas, sendo apenas calculados de forma ligeiramente diferente os perfis de velocidade do ar (TARP) e considerações sobre a altura a que é medido estes mesmos perfis (BLAST).

- Algoritmo MoWiTT

O algoritmo MoWiTT é baseado nos resultados obtidos pela iniciativa levada a cabo pelo Lawrence Berkeley National Laboratory em efectuar um estudo sobre as propriedades térmicas e performances de funcionamento em termos de isolamento térmico de envidraçados de várias configurações e com diversos panos. Esta iniciativa foi levada a cabo numa pequena instalação de teste móvel designada de Mobile Window Thermal Test (MoWiTT) que originou diversos resultados sobre os comportamentos destes elementos de construção (Yazdanian e Klems, 1994). Um dos resultados obtidos pelo MoWiTT foi o coeficiente de convecção térmica em superfícies envidraçadas para fachadas colocadas a baixa altura. A equação utilizada pelo software e baseada no MoWiTT é:

$$h_e = \sqrt{[c_t(\Delta T)^{1/3}]^2 + [\alpha(V_z)^b]^2} \quad (16)$$

Onde:

h_e = Coeficiente de convecção externa ($W m^{-2} K^{-1}$)

c_t = Constante de convecção natural em regime turbulento ($W m^{-2} K^{4/3}$)

ΔT = Temperatura da superfície – Temperatura do ar (K)

a, b = Constantes tabeladas

É de notar a inconsistência de unidades nesta equação devido á sua origem empírica, o que faz com que as constantes a e b apresentadas não sejam adimensionais, embora as suas dimensões físicas não tenham qualquer significado real. Estas constantes dependem da incidência directa do vento na fachada.

Este algoritmo não é apropriado para superfícies de maior rugosidade, altitudes elevadas ou superfícies com elementos de isolamento térmico variáveis.

- Algoritmo DOE-2

O DOE-2 é uma combinação entre o MoWiTT e o BLAST apresentados anteriormente. No entanto, este algoritmo é muito idêntico ao MoWiTT, com a principal diferença de possibilitar a determinação sob as mesmas bases para superfícies mais rugosas.

Analisando estes métodos de cálculo apresentados para a determinação do coeficiente de convecção externa rapidamente se conclui que, devido á sua forte origem empírica, existem grandes divergências entre eles e a sua escolha dependerá fortemente de caso para caso.

O algoritmo simples não será de todo indicado para a simulação da fachada já que não tem em conta qualquer contribuição do efeito térmico fortemente relacionado com a convecção natural, nem a direcção do vento que influencia directamente os coeficientes de pressão do mesmo.

O algoritmo detalhado e o algoritmo MoWiTT são á partida os dois mais indicados para a simulação da fachada. Mas como o detalhado é um algoritmo mais generalizado, e o MoWiTT adapta-se perfeitamente ao caso em estudo, a determinação do coeficiente de convecção externa será feita através deste último.

4.2.2. Convecção Interna

A escolha do modo de cálculo do coeficiente de convecção interna h_i é de grande importância devido a todas as variáveis que influenciam este valor, como está descrito no capítulo 2. Como este coeficiente é extremamente influenciado pelas condições de funcionamento da fachada, e devido ao comportamento transiente desta (variações de temperatura ao longo do dia e da quantidade de ar a passar pelo canal interno), o seu valor possuirá uma variação significativa. Os modelos de cálculo disponíveis pelo software incluem os algoritmos simples, detalhado, *Ceiling Diffuser*, e *Trombe Wall*.

O algoritmo simples considera valores constantes para o coeficiente de convecção interna. Como é óbvio, não é de todo indicado para utilização na simulação da fachada, pelo que não serão feitas referências a estes valores.

- Algoritmo Detalhado

O método de cálculo detalhado é o mesmo que está descrito no algoritmo com o mesmo nome na convecção externa, sendo só considerada a componente de convecção natural. Analisando o algoritmo detalhado para convecção interna (modo de cálculo para convecção natural), existe uma característica que o torna não muito viável. É o facto de apenas considerar o efeito de convecção natural como tendo origem nas relações térmicas entre a superfície e o fluido de passagem. Como já foi referenciado, o vento é uma fonte externa que promove a deslocação de ar na fachada, aumentando ou diminuindo o caudal interno. A quantidade de ar (e conseqüentemente a velocidade deste) influencia directamente a capacidade do fluido em transmitir energia térmica entre as superfícies de contacto. Por esta razão, este coeficiente não é indicado para a simulação térmica da DSF.

- Algoritmo *Ceiling Diffuser*

Este modelo de cálculo considera situações de ocorrência de convecção natural e forçada. É baseado puramente em dados experimentais (Fisher e Pederson, 1997) que relacionam o valor do coeficiente de convecção com o valor do número de renovações por hora do ar no espaço em causa. Considera três tipos de superfícies distintas: pavimento, tecto e paredes. Para este último caso, a relação utilizada é a seguinte:

$$h_i = 1,208 + 1,012 \cdot ACH^{0,604} \quad (17)$$

Onde:

h_i = Coeficiente de convecção interna ($W m^{-2} K^{-1}$)

ACH = Número de renovações por hora

Na figura 31 está representada a curva obtida por esta relação com os valores obtidos em experimentação (estes dados podem ser encontrados em Fisher e Pederson, 1997):

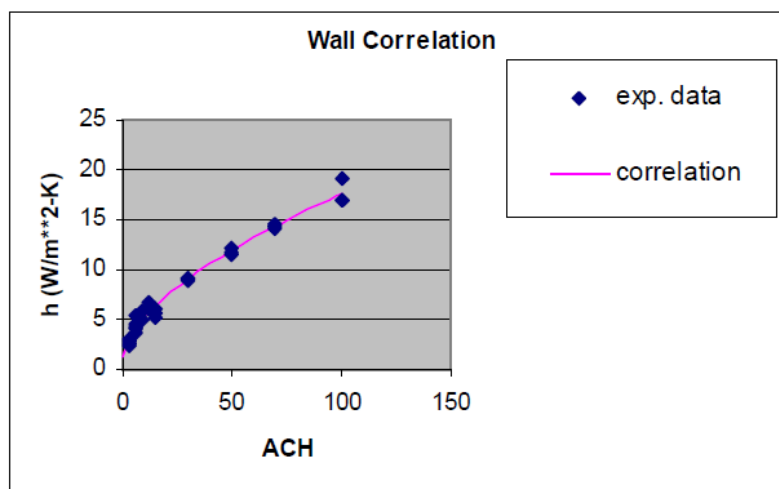


Figura 31 – Relação entre o número de renovações por hora com o coeficiente de convecção interna no algoritmo *Ceiling Diffuser*. Comparação entre a correlação matemática e valores experimentais (EnergyPlus, 2009).

- Algoritmo *Trombe Wall*

Este algoritmo é utilizado para simular o comportamento do coeficiente de convecção numa *Trombe Wall*. É específico para as cavidades de ar existentes entre a superfície de uma parede e uma segunda superfície em contacto com o exterior. Este algoritmo é o utilizado no modo de cálculo do *EnergyPlus* que foi descrito no subcapítulo 3.3.1 (*Exterior Naturally Vented Cavity*). Neste algoritmo, o coeficiente tem como principio a norma ISO 15099, onde o método de cálculo é estabelecido para janelas de duplo envidraçado com espaços de ar não ventilados e de pequena espessura, o que entra em contradição com a restante modulação da fachada. Assim sendo, não será considerado este algoritmo para aplicação na simulação da fachada pelas seguintes razões: (1) foi determinado para cavidades internas de pequena largura, apenas para ser aplicável ao nível dos pequenos espaços de ar existentes em janelas duplas e (2) a não ventilação destas mesmas cavidades.

Por exclusão de partes, será então utilizado o algoritmo *Ceiling Diffuser*. Tendo como base valores experimentais relativamente á passagem de ar, e como a convecção forçada tem um peso maior no valor global de convecção comparativamente á convecção natural, é de esperar que apresente os melhores resultados numa base de comparação com os outros algoritmos.

4.3. Modelo Airflow Network

O modelo *Airflow Network* (AN) providencia os métodos de cálculo necessários para simular fluxos de ar gerados pelas componentes térmica e eólica da ventilação natural, e também por sistemas de ventilação forçada. É também capaz de determinar as transferências de calor e alterações de humidade do ar destes últimos, se existentes na modelação.

Embora tendo como objectivo simular o melhor possível sistemas de ventilação forçada e AVAC, este é o modelo mais indicado para determinar efeitos de ventilação natural. Para tal, durante o cálculo considera os seguintes factores: velocidade e direcção do vento; dimensão e posição das aberturas existentes no edifício e temperaturas exteriores e internas de

cada zona. Através deste modelo determinam-se os caudais trocados entre os espaços internos e o exterior do edifício, bem como os fluxos de ar existentes entre zonas adjacentes.

Para simular as diferenças de pressão existentes nas grelhas de passagem de ar da fachada, o modelo AN permite dois modos de definição de alguns parâmetros das aberturas necessários para a simulação: uma detalhada (*Component Detailed Opening, CDO*) e uma mais simples (*Component Simple Opening, CSO*).

As bases matemáticas do CDO assentam na equação de Bernoulli aplicada a um fluxo de ar que atravessa uma abertura. A figura 32 ilustra um possível perfil de velocidades.

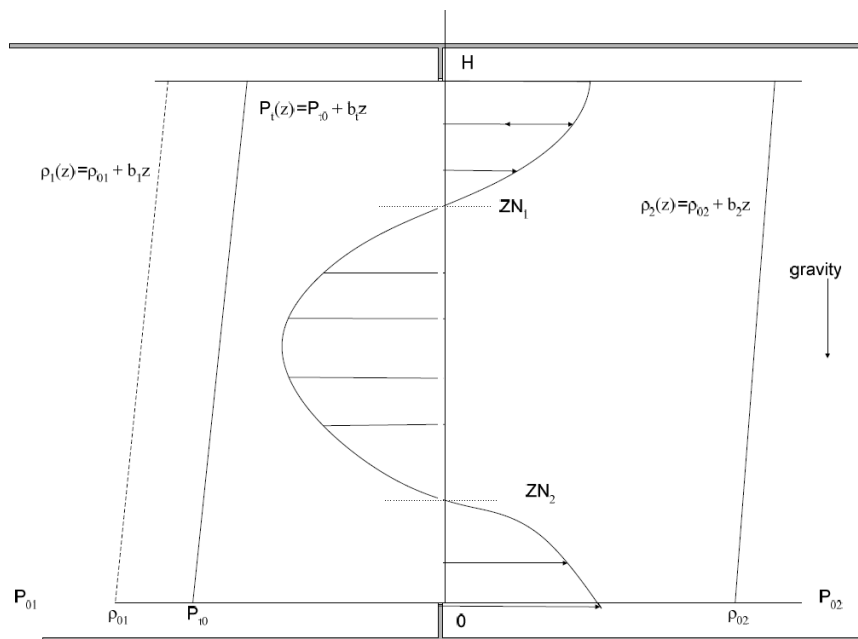


Figura 32 – Perfil de velocidades através de uma abertura vertical no *Component Detailed Opening* (EnergyPlus, 2009).

A equação utilizada pelo software para determinar a velocidade de passagem do fluxo de ar é:

$$v(z) = \sqrt{2 \frac{P_1(z) - P_2(z)}{\rho}} \quad (18)$$

Onde:

$v(z)$ = Velocidade do ar ao nível z (m/s)

$P_1(z)$ = Pressão do ar interior (Pa)

$P_2(z)$ = Pressão do ar exterior (Pa)

ρ = Massa específica do ar a atravessar a abertura (kg/m³)

As pressões e as massas específicas de referência, P_{01} , P_{02} , ρ_{01} e ρ_{02} , são determinadas na posição inferior da abertura, sendo os últimos função da temperatura, pressão e humidade do mesmo. O software calcula igualmente a existência e posição dos possíveis planos neutros ZN_1 e ZN_2 , representados na figura 32, através de um equilíbrio de pressões que resulta em pontos de velocidade zero. Isto é determinado através da seguinte expressão:

$$\frac{g(b_1 - b_2)z^2}{2} + z[g(\rho_{01} - \rho_{02}) - b_t] + (-P_{01} + P_{02} - P_{0t}) = 0 \quad (19)$$

Onde:

g = Aceleração gravítica (m/s²)

b_i = Declives das rectas i

z = Posição vertical (m)

A equação anterior poderá apresentar zero, uma ou duas soluções reais. Nenhuma solução representa a inexistência de um plano ZN_1 (figura 32), e uma solução a existência de um plano (o que significa a presença de fluxo bidireccional). Caso existam três soluções, a abertura admite três zonas distintas, onde as periféricas apresentam uma direcção de fluxo distinta da zona central, como está representado na figura 32.

O modelo *Simple Opening* utiliza o mesmo método para calcular a velocidade de passagem na zona de passagem de entrada/saída de ar. Para calcular a posição de planos neutros, utiliza a seguinte equação (figura 33):

$$Y = \frac{P_{0n} - P_{0m}}{g(\rho_n - \rho_m)} \quad \text{ou} \quad Y = \frac{P_{0m} - P_{0n}}{g(\rho_m - \rho_n)} \quad (18)$$

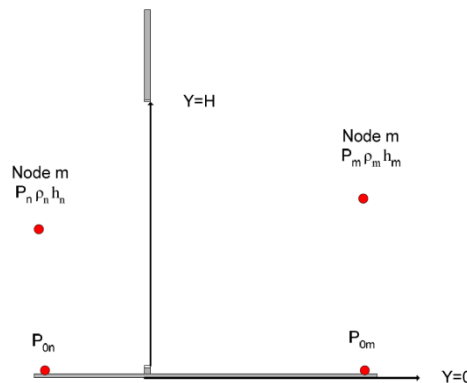


Figura 33 – Abertura no *Component Simple Opening* (EnergyPlus, 2009).

As soluções da equação (18) representam a posição do possível plano neutro (ao contrário do CDO, só existe uma ou zero soluções). Este plano neutro faz a divisão entre duas zonas de fluxos de ar com diferentes direcções.

As diferenças entre o modo CDO e o CSO assentam em dois pontos: (1) nos níveis de detalhe que é possível estabelecer em relação aos graus de abertura das grelhas. Enquanto que a opção CDO permite estabelecer até quatro níveis de abertura (dois no mínimo) - o coeficiente de descarga correspondente e três factores para determinar a dimensão da desta - a opção CSO apenas considera as situações de totalmente aberto ou totalmente fechado; (2) o software E+ permite definir no modelo *Simple Opening* um valor mínimo de diferenças de massas específicas acima do qual poderá ocorrer fluxo bidireccional. Qualquer valor inferior resulta num fluxo de uma só direcção.

Por norma, utilizando o ambiente *DesignBuilder* para iniciar as simulações da fachada, e utilizando a função de cálculo de ventilação natural, o E+ procede os cálculos através do modelo AN, com as grelhas definidas segundo o CDO. Este último, devido às características das grelhas em si já definidas, considera-as com apenas dois graus de abertura, totalmente fechado ou totalmente aberto.

4.4. Resultados de Simulação

Uma vez estabelecida a modelação da célula de teste, a criação da base de dados que contém as condições externas ambientais do período em causa (figuras 28, 29 e 30), e escolhidos os coeficientes de convecção interna e externa (*MoWiTT* para convecção externa e *Ceiling Diffuser* para interna, ver subcapítulo 4.2.) é possível proceder-se á simulação do comportamento térmico da DSF. Os resultados obtidos incluem a temperatura média da fachada (figura 34) e o caudal que a atravessa (figura 35). Estes são considerados os parâmetros globais essenciais para determinar se uma ferramenta de simulação térmica de edifícios como o *EnergyPlus* é ou não capaz de simular correctamente o funcionamento de uma fachada de dupla pele naturalmente ventilada. Outras tentativas em simulação de DSFs resultaram na conclusão de que outros parâmetros mais pormenorizados são extremamente difíceis de simular, e que os resultados apresentados nesta secção, por si só complexos, são os suficientes para determinar a capacidade do software em simular o comportamento térmico de fachadas de dupla pele (Jensen et al, 2008).

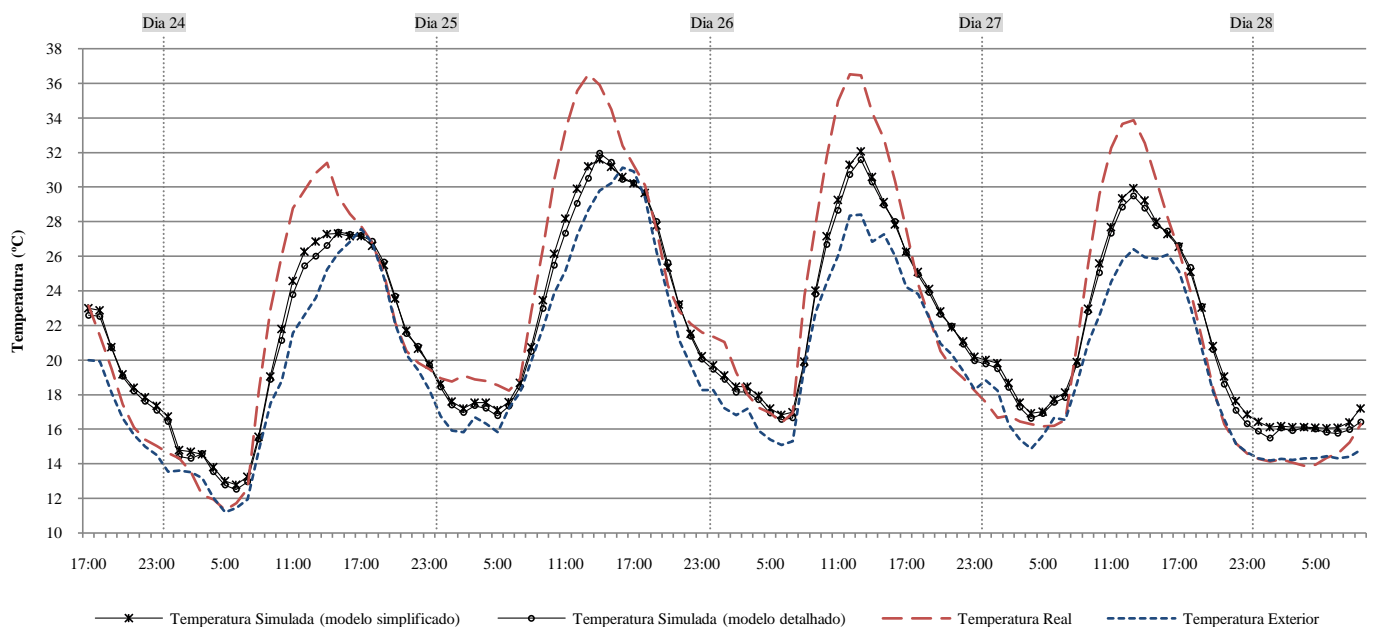


Figura 34 – Resultados da simulação da temperatura interna da DSF.

A diferença de temperaturas ΔT entre o interior da DSF e o exterior tem um impacto acentuado nos caudais de ar que a atravessam. É espectável que durante o funcionamento de uma fachada ventilada, os fluxos de ar sejam consideravelmente elevados face à diferença de temperaturas entre o interior e o exterior, pelo que é importante determinar se o software tem capacidades para simular correctamente o comportamento da temperatura interna da fachada. Teoricamente, pequenos erros no aumento de temperatura interna da DSF podem corresponder á incapacidade em determinar eficazmente o caudal de ar, bem como falhar o balanço de energia entre o exterior e a sala interior a que a fachada encontra-se montada (Saelens, 2002).

Comparando a temperatura interna da DSF observada durante o período de simulação com a temperatura exterior (figura 34), observa-se que durante os períodos diurnos a primeira possui valores mais elevados devido ao aquecimento da fachada provocado pela radiação solar. Durante o período nocturno, os dois valores aproximam-se devido á inexistência de carga térmica a entrar na DSF. Dado que o ΔT aproxima-se do zero, qualquer fluxo de ar registado advém apenas da componente eólica da ventilação natural. A temperatura interna não deverá de ser menor que a temperatura exterior em qualquer altura do dia. A ocorrência pontual de tais valores é devida á transformação dos valores experimentais, originalmente observados em períodos de 10 em 10 minutos, em médias horárias (como acontece, por exemplo, para o dia 24 por volta das 03h00, dia 27 entre as 00h00 e as 03h00, e mais tarde ás 06h00, e dia 28 ás 03h00).

Analisando os valores obtidos pela simulação do modelo detalhado para a temperatura interna da fachada rapidamente se observam as diferenças entre os valores experimentais e as simulações em *EnergyPlus*. A simulação apresenta valores mais baixos de temperatura para as horas de maior carga térmica (aproximadamente 4°C para os picos de temperatura) e uma tendência tanto para sobrestimar os valores durante alguns períodos nocturnos (madrugadas dos dias 24, 27 e 28) como para subestimar outros (madrugadas dos dias 25 e 26). No entanto, o comportamento da curva é bastante fiável, não sendo observando qualquer pico de temperatura que não seja espectável. Não se regista qualquer diferença minimamente significativa entre as curvas de temperatura obtidas para os modelos detalhado e simplificado.

O cálculo do efeito de ventilação natural é particularmente interessante. Por um lado é um dos parâmetros mais difíceis de se simular com ferramentas numéricas, mas por outro é de

extrema importância para determinar correctamente o funcionamento de uma DSF. Por esta razão o caudal de ar é um dos parâmetros a ser analisado.

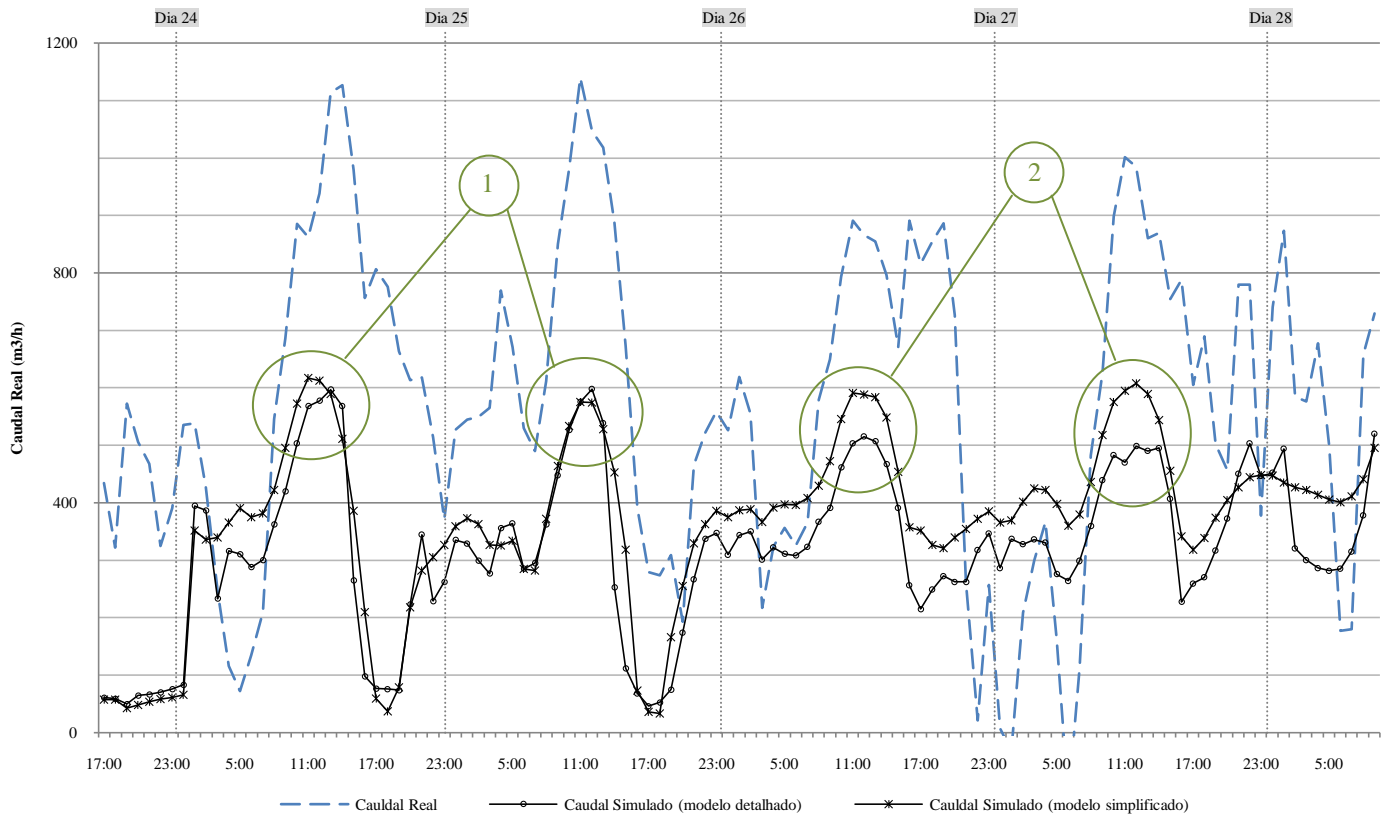


Figura 35 – Resultados da simulação do caudal na DSF.

A figura 35 representa graficamente os resultados obtidos para a simulação do fluxo de ar que atravessa a fachada durante o período em causa. Analisando os valores obtidos, nota-se uma diferença geral e significativa relativamente aos dados experimentais, sendo estes, aproximadamente, o dobro do caudal apresentado pelo E+. Esta diferença de valores poderá ser devida a dois factores:

- Sendo as temperaturas simuladas inferiores aos valores experimentais, as diferenças de pressão de origem térmica que geram o fluxo de ar entre as grelhas superiores e inferiores são menores;
- O modelo utilizado para os cálculos do caudal (*Airflow Network*) pode considerar a existência de fluxo bidireccional (principalmente nas grelhas

superiores devido á maior influência do vento comparativamente ás inferiores), o que resulta numa obstrução ao fluxo de ar que atravessa as grelhas de admissão e exaustão da DSF.

Apesar destas diferenças de valores, as curvas de simulação apresentam um comportamento bastante idêntico ao caudal real. Comparando os dois modelos simulados, ambos apresentam curvas muito idênticas, com diferenças na ordem de $100 \text{ m}^3/\text{h}$. No entanto, o detalhado apresenta pontualmente alguns períodos com melhor aproximação ao caudal real:

- Nota-se um comportamento nos valores máximos de caudal bastante semelhante aos dados reais. Os picos do dia 24 e 25 são iguais (figura 35, 1) e nota-se valores mais baixos comparativamente a estes para os dias 26 e 27 (figura 35, 2), como acontece para a curva de valores experimentais (havendo só uma divergência entre estes dois últimos observada nos valores reais, na ordem dos $100 \text{ m}^3/\text{h}$).
- Possuí melhores comportamentos durante o período nocturno, sendo observável um andamento da curva mais aproximado para as madrugadas dos dias 24, 27 (possuindo uma maior queda nos valores de caudal) e 28 (tendo uma curva mais idêntica á real comparativamente ao modelo simplificado).

Embora se possam observar períodos com comportamentos muito idênticos aos reais, existem outros em que os resultados das simulações não estão de todo de acordo com as observações. A figura 36 identifica estas zonas de maiores divergências. Os resultados apresentados apontam para uma capacidade positiva em simular o efeito da componente térmica que ocorre durante o dia, nas horas de maior carga solar (dado que os andamentos das curvas experimental e simuladas são idênticos). Nas horas nocturnas, pelo contrário, verificam-se alguns desvios entre as curvas experimental e simuladas, onde a influência do vento é obviamente predominante (figura 30).

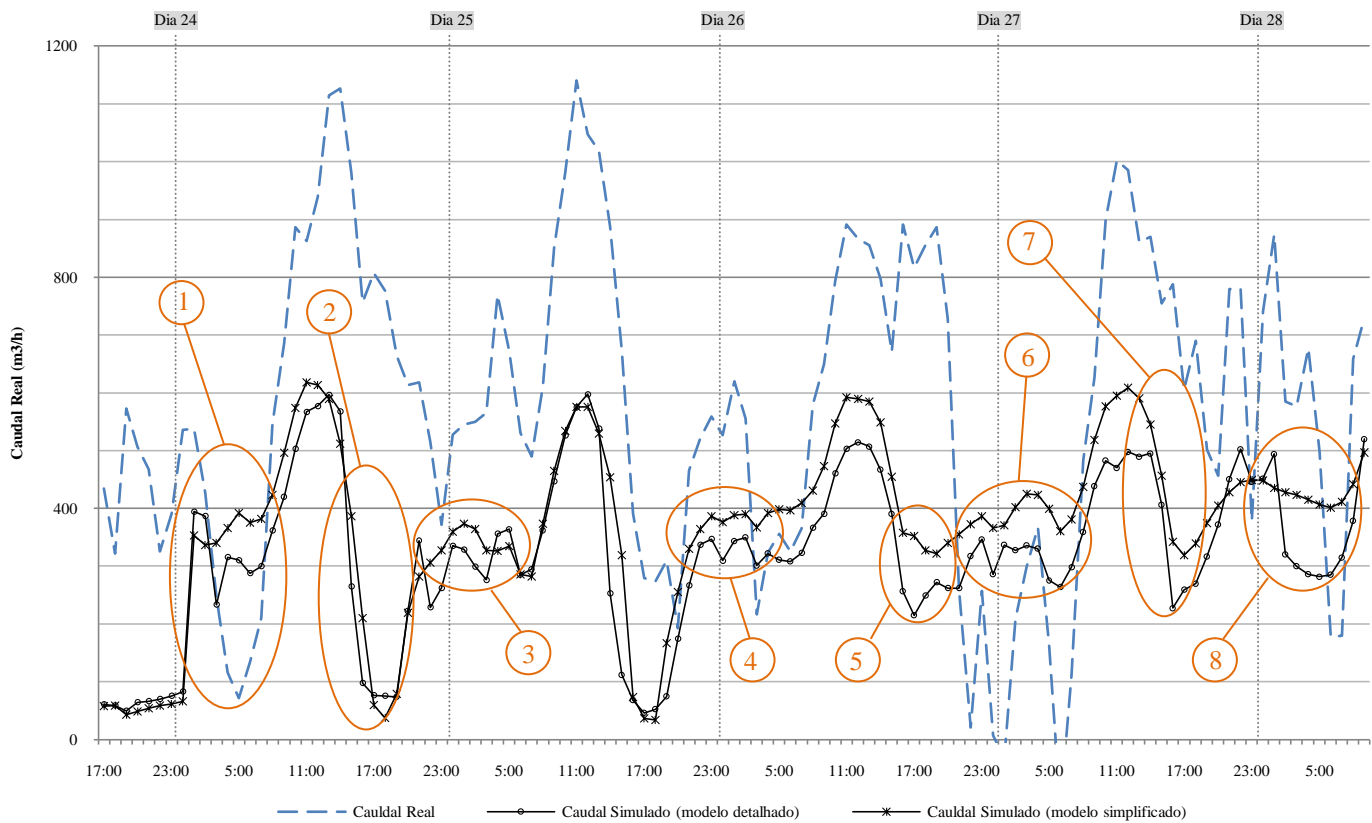


Figura 36 – Resultados da simulação do caudal na DSF. Identificação de períodos de maiores divergências.

1 – Dia 24-04-2008, 2h00 às 8h00.

Neste primeiro período verifica-se uma queda acentuada no declive da curva do caudal experimental que não é acompanhada por parte das simulações. Verificando o gráfico da figura 34 nota-se que a temperatura interna simulada pelo software apresenta valores superiores aos reais. Isto aponta á partida para um maior efeito térmico conduzindo a que os valores simulados não sofram uma quebra tão acentuada. A velocidade do vento bastante baixa para este período (figura 30) não proporciona uma passagem de caudal de ar pelo interior da fachada. Os resultados experimentais apontam para um peso relativamente forte do efeito do vento relativamente ao efeito térmico, onde se nota a queda de valores em função da alteração dos dados do vento para estas horas. O software não regista qualquer alteração idêntica, não reflectindo nos resultados a influência negativa do vento no caudal.

2 – Dia 24-04-2008, 17h00 às 23h00.

Todas as curvas de caudal apresentam um declive acentuado. No entanto a simulação não regista os pequenos aumentos de caudal que se verificam na curva real às 17h00 e às 21h00. Estes dois aumentos pontuais do caudal devem-se ao comportamento do vento, onde às mesmas horas registaram um pequeno incremento na sua velocidade (figura 30). Ambos os modelos não verificaram qualquer alteração devido ao comportamento do vento. Este período demonstra uma insensibilidade do software para tratar a parcela do vento no que respeita ao caudal.

3 – Dia 25-04.2008, 1h00 às 8h00.

Neste período é verificado nos dados experimentais um pico de caudal causado por um aumento da velocidade do vento às 4h00 (figura 30). Mais uma vez as simulações apresentam desvios consideráveis nas curvas dos caudais. A temperatura simulada apresenta menores valores (figura 34), embora esta diferença de temperaturas seja pouco significativa. Isto vem apoiar ainda mais o facto de o software não conseguir simular correctamente os valores dos caudais segundo os dados do vento.

4 – Dia 25-04-2008, 21h00 às 4h00.

Aqui verifica-se um aumento súbito do caudal segundo os valores dos dados experimentais. Esta subida deve-se principalmente á mudança de direcção da incidência do vento, passando este a soprar de nor-noroeste (figura 30), cujos valores dos coeficientes de pressão das grelhas inferiores são positivos (tabela 1), com destaque das grelhas inferiores possuírem maiores cp 's relativamente às superiores, potenciando um fluxo de ar no sentido ascendente. Verifica-se igualmente algum efeito térmico devido a uma diminuição do declive médio da curva de temperatura que não foi acompanhado pelas simulações, resultando num menor peso de convecção natural para estas últimas. No entanto, esta diferença de temperaturas não é significativamente elevada, pelo que houve uma falha da parte dos cálculos em modelar correctamente o efeito do vento neste período.

5 – Dia 26-04-2008, 16h00 às 21h00.

Os valores do caudal verificados durante o funcionamento da célula de teste são justificados pela elevada velocidade do vento (por volta dos 3m/s) e pela direcção que varia de oeste para oés-noroeste, a que correspondem valores positivos de cp 's das grelhas de entrada de ar (tabela 1). Embora o efeito térmico diminua ao longo destas horas, é evidente o forte impacto do vento nos valores do caudal (figura 30). Ao contrário destas observações, as simulações registaram um decréscimo constante na quantidade de passagem de ar pelo interior da DSF, pelo que mais uma vez vem apoiar a ideia de um fraco tratamento dos dados do vento. As temperaturas simuladas são ligeiramente superiores às reais, o que causa á partida um maior efeito térmico (mesmo que pequeno) a ser considerado nos cálculos do caudal. Mesmo assim, os valores destes últimos apresentam um comportamento muito diferente do espectável.

6 – Dia 26-04-2008, 21h00 às 8h00.

Logo após o período anterior, verifica-se uma redução acentuada e irregular no caudal. A inconstância nos valores deste último deve-se ao facto de se ter observado uma queda significativa da velocidade do vento, bem como um comportamento muito irregular da sua direcção (figura 30). A temperatura calculada pelo software é superior à real, proporcionando um maior efeito térmico na fachada, logo a tendência para um comportamento da curva do caudal que leva a valores mais elevados. O *EnergyPlus* demonstrou uma falta de sensibilidade para o tratamento dos dados do vento para este período como também para o anterior, tanto em termos de valores absolutos como em relação às rápidas variações destes.

7 – Dia 27-04-2008, 15h00 às 20h00

Do mesmo modo que aconteceu para o período 2 (dia 24, das 17h00 ás 23h00) regista-se aqui uma descida do caudal simulado com um declive acentuado, bastante próximo da curva do caudal real. No entanto, o software é incapaz novamente de registar alterações pontuais devido ao comportamento do vento (figura 30). Às 16h00 regista-se um aumento momentâneo do caudal devido a um incremento da velocidade do vento, voltando logo de seguida a registar uma diminuição acentuada. Mais tarde, às 18h00, é novamente registado

um aumento do caudal devido a uma alteração da direcção do vento (figura 30) para aproximadamente oés-noroeste, para a qual as grelhas possuem um valor positivo para o c_p , possibilitando o aumento da quantidade de ar a atravessar a fachada. Para ambas as ocorrências, o software não foi capaz de as registar durante os cálculos, fazendo com que o fluxo de ar para este período se apresente consideravelmente inferior.

8 – Dia 27, 20h às 08h00

Observa-se um melhor comportamento para a simulação do modelo detalhado. No entanto, verifica-se mais uma vez uma fraca capacidade do E+ em lidar com a questão dos dados do vento, não estimando um aumento súbito do fluxo de ar na fachada devido a uma alteração da direcção do vento, soprando essencialmente de norte (os valores de c_p 's são negativos para esta direcção, mas as grelhas superiores possuem, em módulo, o dobro do valor, pelo que a diferença entre as inferiores e as superiores resulta positiva). Segue-se um período de inconstância do vento (da 00h00 às 5h00 sensivelmente), onde se verificou alterações bruscas para maiores velocidades ou para direcções predominantemente leste, incidindo directamente na fachada (figura 30). A temperatura simulada é bastante superior á real para este período, o que implicaria á partida um comportamento do caudal simulado em registar uma maior tendência para um aumento.

A análise pormenorizada efectuada aos períodos de maior divergência entre os valores de caudal real e o fluxo de ar simulado pelo software permitem observar um tratamento fraco dos dados do vento, onde se observa que nem sempre o software é sensível a variações bruscas e curtas destes dados. Estas divergências ocorrem predominantemente nos períodos nocturnos, onde a temperatura da fachada é mais baixa e, por consequência, o fluxo de ar interno é regido essencialmente pelo vento.

Para o efeito térmico, são apresentadas nas figuras 37 e 38 as representações gráficas dos caudais simulados em contraste com a diferença de temperaturas entre a simulada e a exterior.

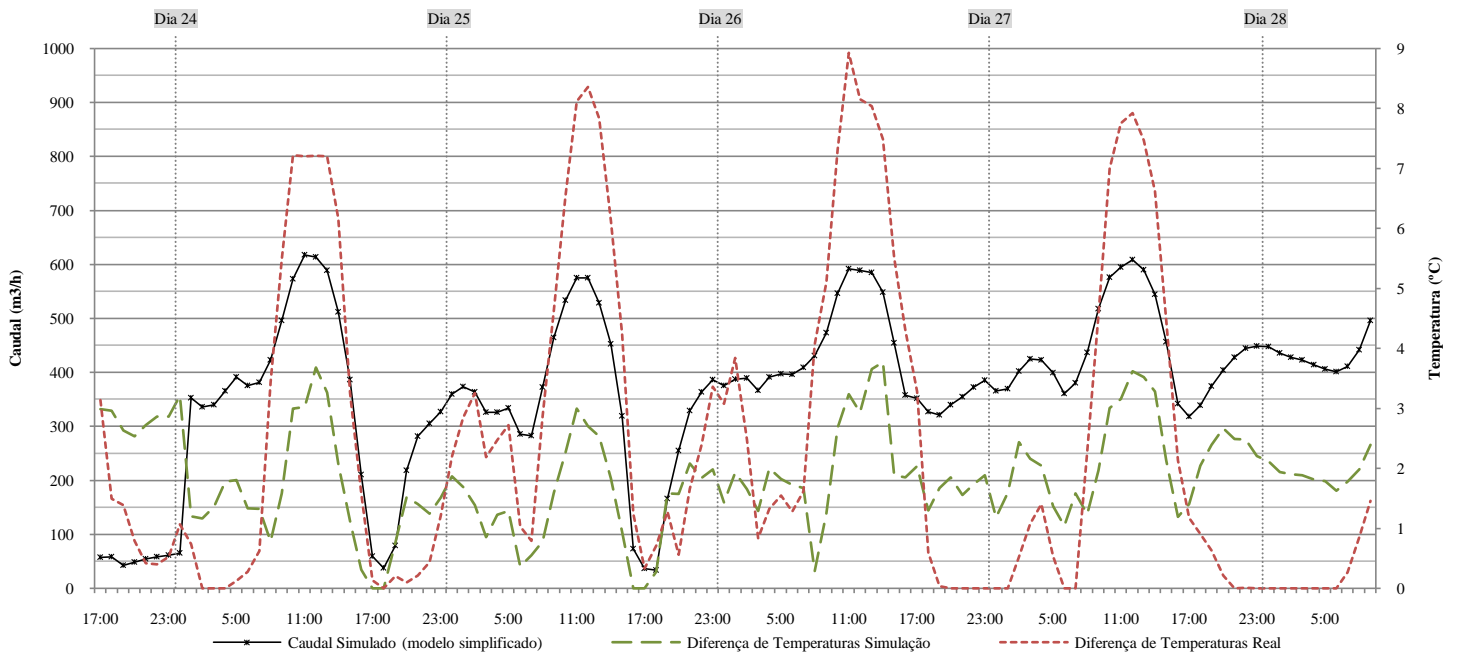


Figura 37 – Caudal simulado do modelo simplificado e respectiva diferença de temperatura simulada.

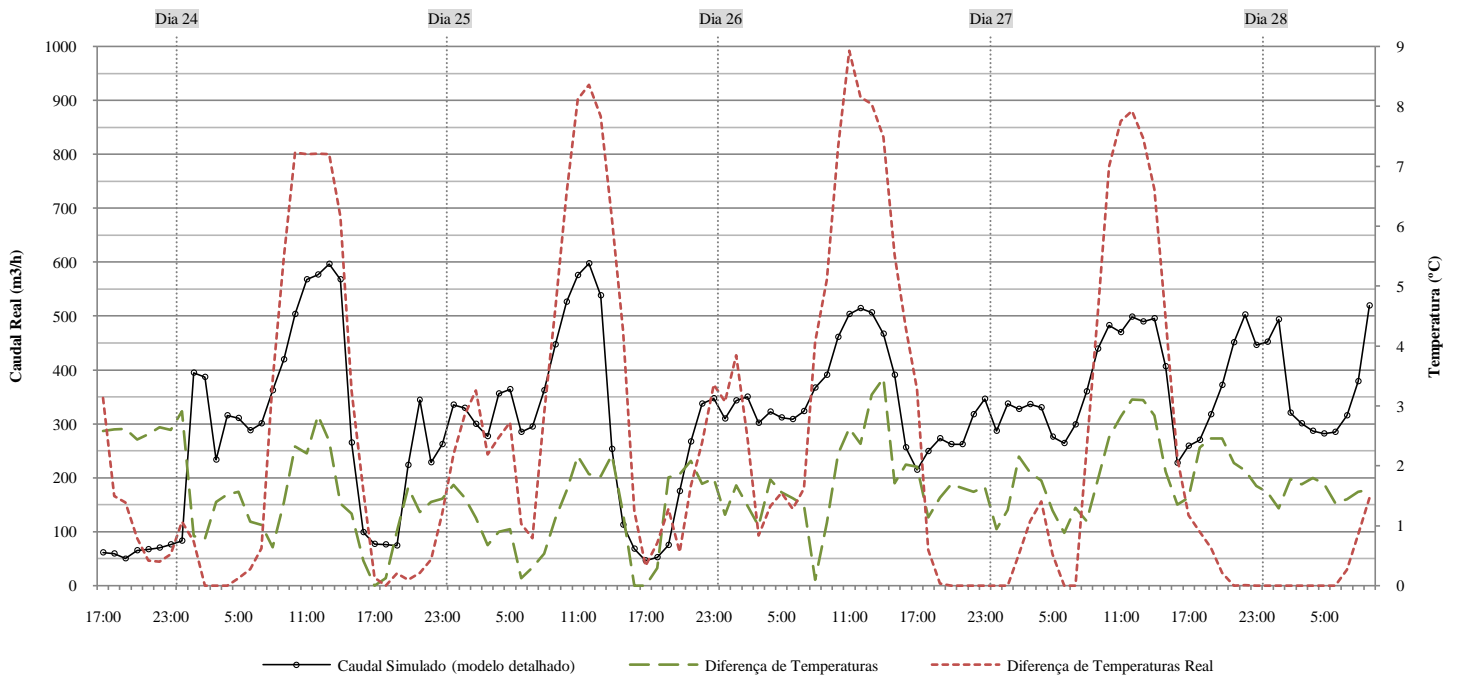


Figura 38 – Caudal simulado do modelo detalhado e respectiva diferença de temperatura simulada.

A análise dos gráficos 37 e 38 demonstra um comportamento espectável dos valores do caudal tendo em conta as diferenças de temperatura na fachada. Observa-se que para os maiores valores de ΔT o caudal é superior, provando assim a capacidade do *EnergyPlus* em responder durante o cálculo dos fluxos de ar aos efeitos térmicos. As divergências observadas, como por exemplo a das 12h00 do dia 25 no modelo detalhado, são devidas á influência do vento. Dado o menor impacto térmico que o software simula para a fachada (figura 34), resultando em menores valores de diferenças de temperatura, os caudais resultam menores. No entanto não é possível indicar com certeza se esta será a única diferença para menores valores de caudal, já que este depende também da capacidade em simular correctamente os impactos do vento na DSF, bem como da geometria desta última (especialmente a presença de sombreamento, cuja simulação necessita de o considerar como um obstáculo á passagem de ar, impondo uma perda de carga), a correcta modelação da fachada, em particular a definição dos coeficientes de pressão das grelhas de passagem de ar.

Perante os resultados do caudal, foi feita uma tentativa de cálculo deste através do modo *Component Simple Opening* do modelo *Airflow Network* (os detalhes podem ser encontrados no subcapítulo 4.3). A razão para tal prende-se á capacidade deste modelo em definir apenas um fluxo unidireccional, já que o *Component Detailed Opening* não o faz, podendo este último efectuar cálculos com passagem de ar em duas direcções através das grelhas. É espectável que os menores valores de caudal poderão advir de um fluxo que se oponha á entrada de ar nas grelhas inferiores (ou saída do mesmo pelas superiores), causando assim um impedimento ao fluxo de ar que não existe na realidade (dado que a altura das grelhas é pequena). Para tal é necessário abandonar o ambiente do *DesignBuilder* e efectuar estas alterações através do *IDF Editor* do E+ (o DB permite a exportação do modelo e características de simulação para um ficheiro .idf). Deste modo, é definido o CSO para as grelhas de passagem de ar com valores elevados de diferenças de massas específicas mínimas (mais uma vez, para pormenores ver o subcapítulo 4.3). Os resultados são apresentados na figura 39 utilizando a modelação simplificada.

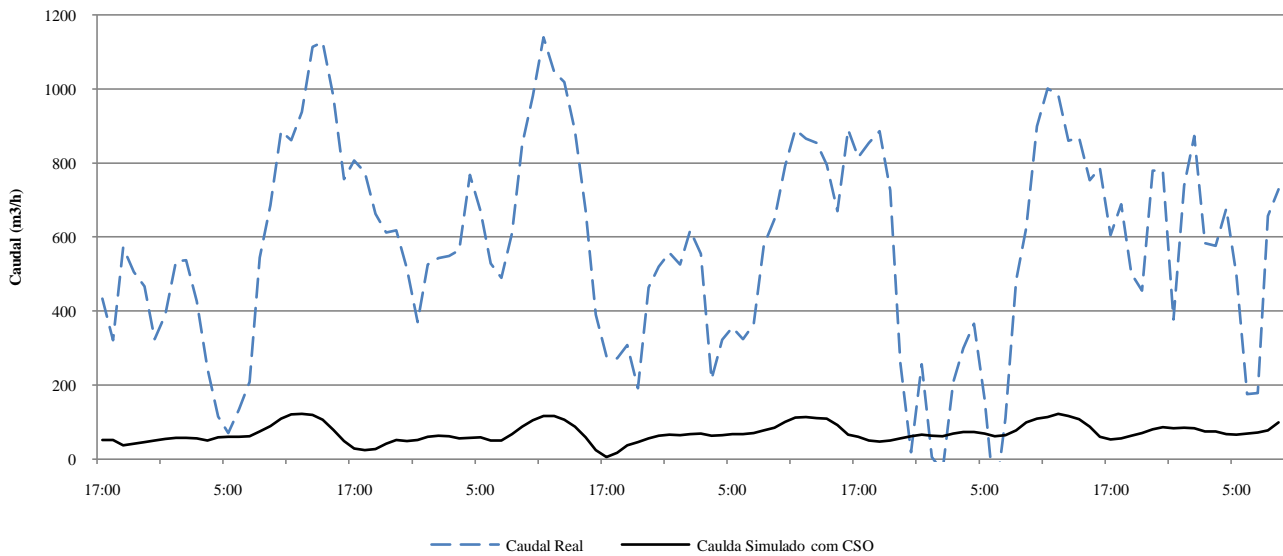


Figura 39 – Caudal simulado através do *Component Simple Opening*.

O gráfico da figura 39 permite-nos concluir que os resultados são desanimadores. Impedindo a passagem de fluxo bidireccional, os valores simulados são muito menores comparativamente aos valores reais. Não foi, no entanto, possível esclarecer a razão para estes resultados.

Não é conclusivo qual dos modelos (simples ou o detalhado) poderá apresentar melhores resultados sobre a variação de caudal ao longo dos dias. Os valores apresentados apontam para o modelo detalhado como sendo o mais provável devido á melhor aproximação verificada durante as horas de maior incidência de radiação solar comparativamente ao outro modelo (como se pode verificar no gráfico 35). No entanto, a dificuldade em discernir qual dos modelos é mais fiável advém das diferenças entre o caudal simulado e o real, apresentando este valores sensivelmente duas vezes superiores durante as horas de maior radiação solar incidente na fachada. O efeito do vento nos valores do caudal interno da DSF são no geral bastante fracas, embora se possa considerar que á partida o modelo detalhado possua também uma capacidade ligeiramente superior para apresentar melhores resultados relativamente a estes dados, embora fosse espectável que esta diferença fosse mais significativa, já que este modelo inclui os valores reais de coeficientes de pressão das grelhas ao nível individual de cada uma, enquanto o simplificado apresenta apenas valores médios para toda a fachada.

5. Conclusões

Neste trabalho foram efectuadas simulações térmicas de uma fachada de dupla pele ventilada naturalmente utilizando o software *EnergyPlus* e o interface *DesignBuilder*. Esta fachada encontra-se montada no Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, e o seu funcionamento permitiu obter dados experimentais para a validação dos resultados das simulações.

No período em causa (dia 23 ao dia 28 de Abril de 2008) a fachada foi posta em funcionamento em regime de fluxo exterior (exclusivamente através de ventilação natural), com um sombreamento na posição inferior e lâminas a 45°. A modelação e simulação da fachada em E+ foram efectuadas com estas características, bem como as propriedades térmicas e ópticas dos elementos construtivos da DSF. Foram criados dois modelos, um simplificado (onde a fachada é considerada como uma única zona independente) e um modelo detalhado (que inclui a repartição da DSF em cinco zonas distintas, de modo a isolar cada grelha de ventilação e os envidraçados). Foram comparados caudais e temperaturas simuladas com os dados experimentais retirados. Para o cálculo do caudal, foi feita também uma tentativa de simulação utilizando o método de cálculo *Component Simple Opening*, uma alternativa ao *Component Detailed Opening*, ambos usados pelo *Airflow Network* do software E+, mas sendo o primeiro o estabelecido para simulação quando utilizado o interface *DesignBuilder*.

Os resultados obtidos são bastante promissores. Embora o software E+ seja de simulação térmica de edifícios, e não tenha sido desenvolvido, até á data deste trabalho, um modelo interno ao software para o cálculo térmico e ventilação natural destes elementos, os resultados vão muito ao encontro do comportamento verificado durante a tiragem de valores da fachada.

O aspecto mais positivo destes resultados é exactamente a aproximação ao comportamento real dos parâmetros observados (temperatura e caudal). Apesar do fluxo de ar gerado por ventilação natural que atravessa a fachada ser um parâmetro excepcionalmente difícil de ser simulado através de ferramentas numéricas, o software apresentou uma capacidade relativamente positiva em prever um comportamento bastante idêntico,

respondendo até certo ponto aos efeitos de convecção natural gerados pela diferença de temperatura entre o interior da DSF e o exterior, e aos efeitos do vento.

No entanto, diversas divergências significativas foram observadas. As temperaturas simuladas resultaram menores que as reais para as horas de maior incidência solar, enquanto que períodos noturnos apresentaram por vezes valores superiores, e em outros casos uma subestimação dos mesmos. Isto poderá ser devido a uma incapacidade do software em lidar correctamente com todos os dados introduzidos sobre as propriedades dos elementos construtivos (térmicas e ópticas) que foram utilizados para montagem da fachada.

Os caudais obtidos pela simulação são menores que os reais, havendo as maiores divergências nas horas de maior carga térmica (o caudal real é aproximadamente o dobro do simulado), da mesma maneira que acontece para a temperatura. Tendo em conta que uma grande parcela do caudal advém da diferença de temperaturas é espectável que este venha com menores valores já que o software apresentou perfis de temperatura menores do que os reais (o que por si só é um indicador que o efeito térmico é bem calculado). Por outro lado, os resultados apresentaram uma capacidade inferior em lidar com os dados do vento, principalmente em casos de mudanças bruscas e de pequenos períodos com diferenças significativas de velocidade e/ou direcção. Ainda sobre o caudal, as expectativas dos resultados utilizando o modo de cálculo *Component Simple Opening* do modelo *Airflow Network* foram bastante frustradas, apresentando resultados muito inferiores ao caudal real.

Comparando os resultados obtidos entre os dois modelos utilizados, não se pode concluir em definitivo qual destes é melhor para simular uma fachada de dupla pele ventilada naturalmente. Ambos os modelos apresentaram perfis de temperatura muito semelhantes, pelo que as eventuais diferenças observadas nos comportamentos dos caudais provêm do modo como é tratado o efeito do vento como um dos motores do fluxo de ar que atravessa o canal interno da fachada. As análises efectuadas a este parâmetro demonstraram um comportamento ligeiramente mais aceitável do modelo detalhado para simular o caudal de acordo com o comportamento do vento ao longo do período de simulação. No, seria espectável que esta diferença fosse mais significativa, tendo em conta que este modelo possui as grelhas em zonas distintas, permitindo a introdução dos valores de coeficientes de pressão de cada uma. As diferenças entre modelos são só pontuais, não eliminando o facto de ambos possuírem valores significativamente inferiores aos reais.

Tendo em conta as divergências observadas, estas simulações vêm demonstrar a dificuldade existente em simular correctamente todos os efeitos termodinâmicos que ocorrem nestes elementos construtivos, e as dependências complexas e extremamente transientes entre eles, mesmo por parte de uma forte e completa ferramenta de simulação térmica de edifícios. A temperatura interna da fachada, o caudal que a travessa, o tratamento correcto dos dados ambientais e o desempenho óptico da fachada (importante para determinar o efeito da radiação solar em toda a fachada) são parâmetros que influenciam muito o desempenho de uma DSF, e embora os resultados sejam animadores, este programa não aparenta conseguir estabelecer correctamente todas as relações existentes entre estes.

5.1. Melhorias e Perspectivas Futuras

No decurso deste trabalho levantaram-se questões pertinentes que poderão influenciar a capacidade de simulação de fachadas de dupla pele ventiladas naturalmente pelo software *EnergyPlus*. Dois pontos provaram-se importantes de ser esclarecidos:

- A simulação das temperaturas deu resultados inferiores aos esperados. Por outro lado, o cálculo de ventilação natural depende destes valores para determinar a componente térmica do fluxo de ar interno da fachada, o que torna importante esclarecer a razão de diferença de temperaturas entre os dados experimentais e os resultados das simulações.
- Era espectável que, utilizando o modo de cálculo *Component Simple Opening* do *Airflow Network*, a simulação apresentasse resultados, no mínimo, idênticos aos obtidos com o modo *Detailed Opening*. Os valores obtidos foram muito inferiores aos reais, pelo que merece alguma investigação.

Não esquecer que estas considerações são para uma simulação usando o motor de cálculo do *EnergyPlus* como se encontra, o que não dispensa de modo algum futuros desenvolvimentos de módulos de cálculos específicos para simulação de fachadas ventiladas naturalmente, baseadas em diversos modelos matemáticos que já foram desenvolvidos até á data. Tudo aponta para uma adaptação relativamente fácil deste software em executar simulações deste tipo de elementos dinâmicos.

ANEXO

Propriedades geométricas, térmicas e ópticas da DSF

A1. Envidraçados

O pano interior da fachada é constituído por dois elementos de vidro e uma pequena caixa-de-ar intermédia. O vidro interior deste pano possui 6mm de espessura, o vidro exterior 5mm com uma cobertura de baixa emissividade e a caixa-de-ar tem 16mm. O pano exterior da fachada é constituído apenas por um elemento de envidraçado de 8mm de espessura. A condutividade térmica de todos os envidraçados é de $1,2 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ e as suas propriedades ópticas estão apresentadas na tabela A1.

Tabela A1 – Propriedades ópticas dos envidraçados do pano interior e exterior.

Propriedades do Espectro Solar	Pano interior	Pano Exterior
Transmissividade Solar	0,303	0,753
Reflexão Solar Exterior	0,309	0,07
Reflexão Solar Interior	0,364	0,07
Propriedades do Espectro Visível		
Transmissividade Visível	0,602	0,0875
Reflexão Visível Exterior	0,154	0,079
Reflexão Visível Interior	0,171	0,079
Propriedades do Espectro Infra-vermelho (I.v.)		
Transmissividade I.v.	0	0
Reflexão I.v. Exterior (emissividade)	0,07	0,07
Reflexão I.v. Interior (emissividade)	0,07	0,07

É importante referir que o *DesignBuilder* apresenta valores calculados pelo *EnergyPlus* para o coeficiente global de transferência de energia U e para o factor solar g de ambos os panos da fachada após a introdução destes dados. No entanto estes dados não podem ser considerados como características destes mesmos panos pelas seguintes razões:

- O cálculo de balanço de energias feito pelo $E+$ para determinar o factor U é efectuado através de normas apresentadas pela ASHRAE para condições nominais de inverno e sem considerar radiação solar;
- O cálculo é efectuado tendo em conta que o pano se encontra em contacto com o ambiente exterior;

- O factor g é calculado segundo valores normalizados para condições de verão, considerando uma incidência solar de valor constante.

A pequena cavidade interna do pano interior considera as seguintes propriedades para o ar:

Tabela A2 – Propriedades do ar na cavidade interna do pano interior.

Coeficiente de Condutividade Térmica	
0,002873	$\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$
Coeficiente de Viscosidade	
$0,37230 \times 10^{-6}$	$\text{Kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$
Calor Específico	
1200	$\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$

A2. Sombreamento

O sistema de sombreamento instalado na DSF consiste num pano de persianas venezianas, definidas no software como sendo o sombreamento interior do pano exterior. A figura A1 esquematiza este tipo de sombreamento, e os dados introduzidos no software para este elemento da fachada encontram-se apresentados nas tabelas A3 e A4.

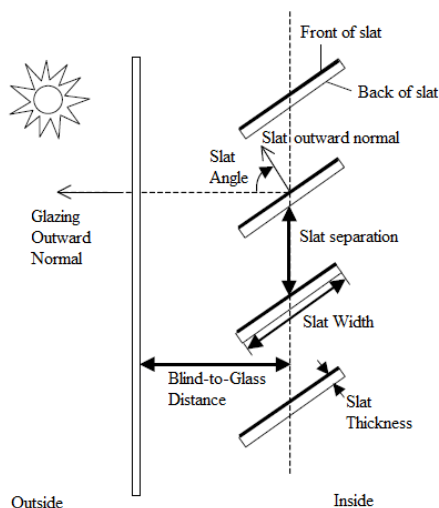


Figura A1 – Esquema do sistema de sombreamento (EnergyPlus, 2009).

O programa permite introduzir as dimensões das lâminas (largura, altura e espessura), bem como a distância vertical entre elas, ângulo de posicionamento e a distância do sombreamento ao pano exterior da DSF. As propriedades térmicas e ópticas destas também são tidas em consideração, nomeadamente a condutividade térmica e propriedades da radiação directa e difusa dos espectros solar e visível. Para o espectro de infra-vermelhos, os valores a introduzir correspondem á transmissividade e emissividade hemisféricas. Por último, são definidos coeficientes de aberturas de passagem de ar à direita e esquerda das persianas, bem como superiormente e inferiormente. A figura A2 esquematiza o significado destes multiplicadores.

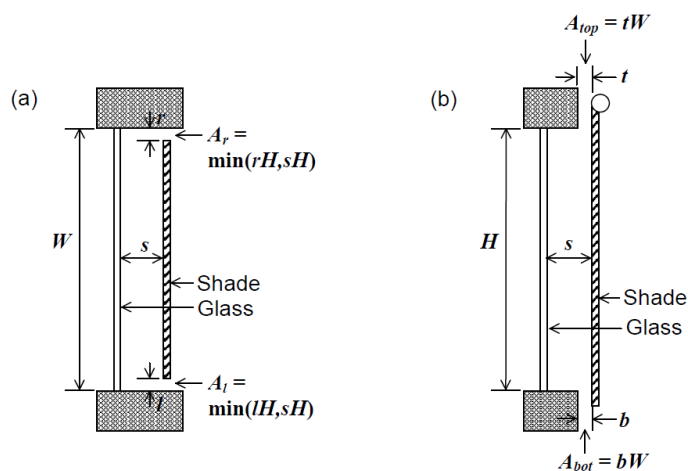


Figura A2 – Esquema das aberturas laterais do sombreamento: vista superior – a); vista lateral – b) (EnergyPlus, 2009).

Segundo a figura A2, A_l/sH corresponde ao multiplicador da esquerda, A_r/sH o da direita, A_{bot}/sW define a abertura inferior e por último A_{top}/sW o multiplicador da abertura superior.

Tabela A3 – Propriedades gerais do sombreamento (segundo o fornecedor).

Propriedades Gerais	
Distância persianas - vidro exterior	0,06
Orientação das lâminas	Horizontal
Largura das lâminas (m)	0,05
Separação vertical entre telas (m)	0,05
Espessura das lâminas	0,001
Ângulo de posição das lâminas (°)	45
Condutividade ($W\ m^{-1}\ K^{-1}$)	0,99
Ângulo mínimo	0
Ângulo máximo	90

Tabela A4 – Propriedades ópticas do sombreamento (segundo o fornecedor).

Propriedades Ópticas da Radiação	Solar Directa	Solar Difusa	Visível Directa	Visível Difusa	Infra-Vermelhos
Transmissividade	0,51	0,4	0,39	0,33	0,285
Reflexividade, frente	0,55	0,55	0,8	0,8	0,629
Reflexividade, costas	0,55	0,55	0,8	0,8	0,629

A grande limitação do software E+ para simulação do sombreamento consiste na incapacidade em definir uma altura de posição do mesmo. O software considera sempre que qualquer elemento de sombra de um envidraçado ocupa a totalidade da área do mesmo, incluindo as divisórias (a caixilharia não é coberta pelo sombreamento). Como é necessário simular o modelo com o sombreamento totalmente estendido, não é necessário tomar qualquer medida sobre esta limitação. Caso fosse necessário indicar uma posição intermédia das persianas, seria necessário dividir a zona dos envidraçados a meio de modo a criar duas zonas independentes para indicar a presença do elemento de sombra na porção superior e a ausência deste na zona inferior.

A3. Caixilharia

A caixilharia da DSF é de alumínio (sem corte térmico) e a definição da sua geometria é bastante detalhada. Para além do material e as suas propriedades térmicas, é igualmente possível determinar o número total de divisórias existentes e as dimensões gerais destas (figura A3). A caixilharia é definida para o interior da área delimitada para cada envidraçado, ou seja, durante a modelação da fachada indica-se a área ocupada pelo envidraçado incluindo a caixilharia.

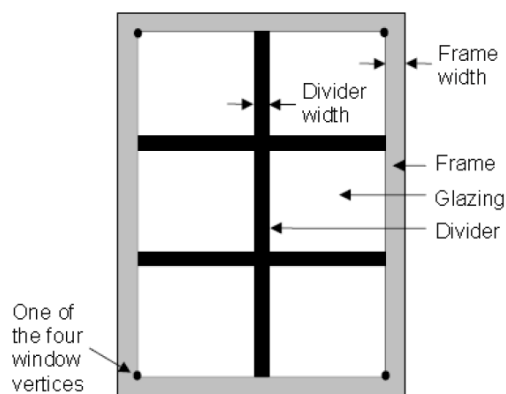


Figura A3 – Esquema geral da caixilharia dos envidraçados (DesignBuilder Software, 2009).

Outras definições mais pormenorizadas sobre a geometria da caixilharia estão apresentadas na tabela A6 e esquematizadas na figura A4. O tipo de divisórias a definir corresponde à opção *DividedLite* (figura A4, c).

Tabela A5 – Pormenores da geometria da caixilharia.

Geometria	Dimensão (mm)
Profundidade do relevo lateral interior	0
Profundidade do relevo inferior interior	0
Projeção exterior das divisórias	0
Projeção interior das divisórias	0
Projeção exterior da caixilharia	8
Projeção interior da caixilharia	12

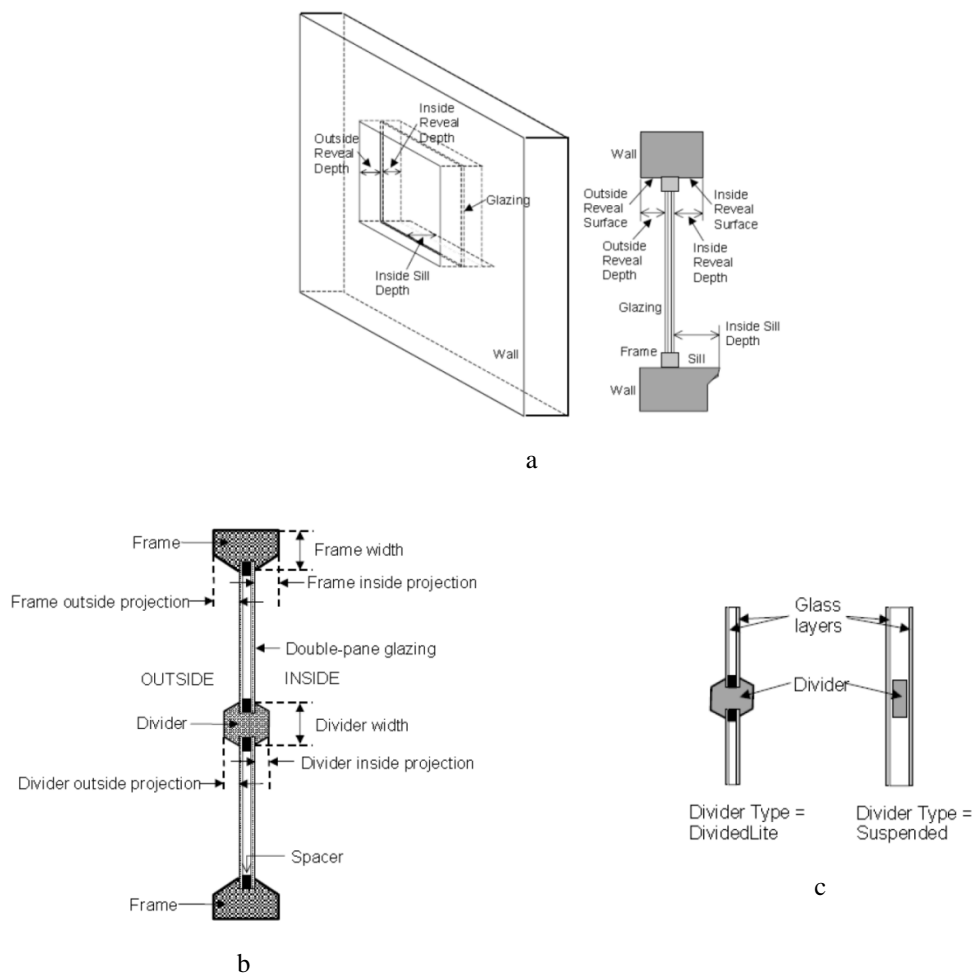


Figura A4 – Representações esquemáticas do modo de definição caixilharia da DSF: Dimensões de relevos – a); Dimensões das divisórias – b); Tipo de divisórias – c) (DesignBuilder Software, 2009).

As propriedades do alumínio utilizado na caixilharia estão definidas segundo a norma ISO 10456 (tabela A6).

Tabela A6 – Propriedades térmicas e ópticas do alumínio da caixilharia da DSF.

Propriedades Térmicas	
Condutividade Térmica ($\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$)	160
Calor Específico ($\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$)	880
Massa Volúmica (kg/m^3)	2800
Propriedades Ópticas e Físicas da Superfície	
Absorvidade Térmica	0,3
Absorvidade Solar	0,3
Absorvidade Visível	0,3
Rugosidade	6

A absorvidade térmica aqui definida representa a fracção de radiação de longos comprimentos de onda que é absorvida pelo material. Este parâmetro é utilizado para calcular a troca de energia por radiação entre várias superfícies, afectando os balanços energéticos das mesmas, tanto numa perspectiva interior como exterior do espaço.

De notar também que a absorvidade solar aqui definida representa a fracção de radiação solar incidente no material e absorvida pelo mesmo, e já inclui as radiações correspondentes ao espectro visível e parte dos comprimentos de onda do espectro de infra-vermelhos. A absorvidade visível é definida com o objectivo de definir as trocas de energia entre superfícies por radiação com comprimentos de onda dentro deste espectro, e para estabelecer condições de iluminação natural no interior do espaço.

A rugosidade superficial do alumínio é definida com recurso a uma escala que varia entre muito rugoso (1) e muito suave (6). Este parâmetro é importante para os algoritmos de cálculo dos coeficientes de convecção estabelecidos para a simulação.

Para além das características físicas e ópticas, é possível indicar um factor de condutividade térmica para ser aplicado aos elementos de caixilharia da DSF. Este coeficiente terá que ser igual a 1 para que o software de cálculo entre em total consideração com as características térmicas do alumínio.

A4. Grelhas de Passagem de Ar

As grelhas de admissão e exaustão de ar estão localizadas superiormente e inferiormente aos envidraçados de ambos os panos. As posições e geometria destes elementos ficam facilmente definidas durante a modelação da fachada. Cada grelha possui um comprimento de 1,63m e uma altura de 0,225m.

Em termos de propriedades, é necessário indicar o coeficiente de descarga das grelhas de modo a definir a obstrução destas á deslocação de ar promovida pela ventilação natural. Infelizmente não existem valores experimentais destes coeficientes devido a dificuldades na medição do caudal que atravessa cada grelha, pelo que foi utilizado um coeficiente médio de 0,4 para as grelhas superiores, 0,6 para as grelhas inferiores e 0,001 quando se encontrem fechadas.

No caso do modelo detalhado, devido á diferenciação de zonas entre cada grelha, é possível indicar individualmente o coeficiente de descarga para cada uma. O mesmo não acontece para o modelo simplificado, onde a presença de uma única zona para toda a DSF não permite definir diferentes valores entre grelhas do mesmo pano. Isto resulta na limitação deste último modelo em diferenciar grelhas superiores das inferiores tanto para o pano interior como para o exterior. Assim sendo, é considerado uma média de 0,5 para os coeficientes de descarga de todas as grelhas quando consideradas como totalmente abertas.

A5. Paredes Externas

As paredes externas são construídas com blocos de betão celular autoclavado (YTONG) com espessura de 0,30m e reboco interior e exterior de 0,015m, fazendo uma espessura total da parede de 0,33m. A definição destes elementos é importante para estabelecer a transferência de energia entre a zona 2 e o exterior do edifício. Na tabela A7 estão indicadas as propriedades térmicas e ópticas do betão celular autoclavado e do reboco das paredes. As considerações feitas anteriormente para o alumínio no que respeita aos valores das propriedades ópticas e físicas da superfície são também aqui aplicáveis.

Tabela A7 – Propriedades térmicas e ópticas dos elementos constituintes das paredes exteriores.

Propriedades Térmicas	Betão Celular Autoclavado YTONG	Reboco
Condutividade Térmica ($W m^{-1} K^{-1}$)	0,2	1,15
Calor Específico ($J kg^{-1} K^{-1}$)	1000	653
Massa Volúmica (kg/m^3)	650	1950
Propriedades Ópticas e Físicas da Superfície		
Absorsividade Térmica	0,9	0,9
Absorsividade Solar	0,7	0,7
Absorsividade Visível	0,7	0,7
Rugosidade	3	4

A estrutura do edifício é constituída por pilares de betão com secção de $0,2 \times 0,2 \text{m}^2$ revestidos interiormente por plaquetas do material das paredes com $0,05 \text{m}$ de espessura. Como o material é o mesmo das paredes, não foi feita qualquer consideração durante a modelação sobre estes pilares, já que o balanço energético entre a zona 2 e o exterior não será afectado pelos mesmos.

A6. Cobertura

A cobertura da instalação é formada por uma camada de laje com $0,14 \text{m}$ de espessura, revestida interiormente por plaquetas do material das paredes com $0,075 \text{m}$ de espessura. Exteriormente é coberta por uma tela impermeabilizante de polietileno com $0,002 \text{m}$ de espessura (figura A5).

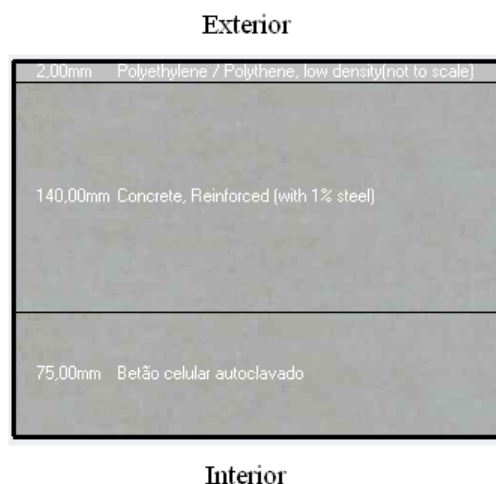


Figura A5 – Estratificação da cobertura (Design Builder Software 2009).

As propriedades térmicas, físicas e ópticas de cada elemento constituinte da cobertura estão apresentadas na tabela A8. As propriedades para a camada de betão celular autoclavado foram já apresentadas durante a descrição das paredes externas do edifício.

Durante a tiragem de dados da DSF encontrava-se montado a meio da cobertura um alçapão metálico de secção quadrada $0,5 \times 0,5 \text{m}$. A modelação deste elemento foi feita

através da introdução de uma sub-superfície na cobertura, actuando assim como ponte térmica segundo as definições do software. As propriedades do material de que é feito o alçapão encontram-se na tabela A8.

Tabela A8 – Propriedades térmicas e ópticas dos elementos constituintes da cobertura.

Propriedades Térmicas	Polietileno	Laje	Alçapão
Condutividade Térmica ($\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$)	0,33	2,3	50
Calor Específico ($\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$)	2200	1000	450
Massa Volúmica (kg/m^3)	920	2300	7800
Propriedades Ópticas e Físicas da Superfície			
Absorvidade Térmica	0,9	0,9	0,3
Absorvidade Solar	0,7	0,6	0,3
Absorvidade Visível	0,7	0,6	0,3
Rugosidade	4	3	3

A7. Pavimento

O pavimento da instalação é constituído por três camadas principais: superiormente é coberto por uma camada de betonilha de regularização com 0,05m de espessura, uma camada intermédia de massame armado com 2% de armadura (espessura 0,1m) e uma última camada inferior de 0,15m de enrocamento (figura A6). As propriedades de cada camada estão apresentadas na tabela A9.



Figura A6 – Estratificação do pavimento (DesignBuilder Software, 2009).

Tabela A9 – Propriedades Térmicas e ópticas dos elementos constituintes do pavimento.

Propriedades Térmicas	Betonilha de Regularização	Massame Armado (2%)	Enrocamento
Condutividade Térmica ($\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$)	1,350	2,5	2,8
Calor Específico ($\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$)	1000	1000	1000
Massa Volúmica (kg/m^3)	1800	2400	2600
Propriedades Ópticas e Físicas da Superfície			
Absorsividade Térmica	0,9	0,9	0,9
Absorsividade Solar	0,6	0,6	0,6
Absorsividade Visível	0,6	0,6	0,6
Rugosidade	3	3	3

Referências Bibliográficas

- AHSRAE. *AHSRAE Handbook - Fundamentals*. Atlanta: American Society of Heating, Refrigeration, and Air-Conditioning Engineers, 2001.
- Arons, D., e L. Glicksman. “Double Skin, Airflow Facades: Will the Popular European Model Work in the USA?” Building Technology Program, Massachusetts Institute of Technology, Massachusetts, USA, 2003.
- Boake, T. “The Tectonics of the Double Skin.” *Understanding double facade systems*. Março de 2004.
- Boake, T., et al. “The Tectonics of the Double Skin.” School of Architecture, University of Waterloo, 2003.
- Çengel, Y. *Heat Transfer: A Practical Approach - 2nd edition*. Nevada, Reno: McGraw-Hill, 2002.
- Crespo, A. “History of the Double Skin Facade.” Graduate School of Design, Harvard University, 1999.
- DesignBuilder Software. “Design Builder 1.2. User Manual.” 2006.
- DOE. *Thermodynamics, Heat Transfer and Fluid Flow Fundamentals Handbook - Volume 2*. Whashington, D.C., 1992.
- Doebber, I., e M. McClintock. “Analysis Process for Designing Double Skin Facades and Associated Case Study.” Arup, San Francisco, 2006.
- Duarte, T. “Verificação Experimental do Comportamento Térmico de uma Fachada de Dupla Pele com Ventilação Natural.” ISEL, 2009.
- EnergyPlus. *EnergyPlus Documentation - Engineering Reference*. U.S Department of Energy, 2009.
- Faggembauu, D., M. Costa, M. Soria, e A. Oliva. “Numerical Analysis of the Thermal Behavior of Ventilated Glazed Facades in Mediterranean Climates.” Universitat Politècnica de Catalunya, Catalunya, 2003.
- Fisher, D., e C. Pederson. *Convective Heat Transfer in Building Energy and Thermal Load Calculations*. ASHRAE Transaction, Vol. 103, Pt. 2, 1997.
- Flamant, G., N. Heijmans, E. Guiot, Gratia E., e I. Bruyere. “Ventilated Double Facades. Determination of the energy performance of ventilated double facades by the use of simulation integrating the control aspects - Modelling aspects and assessment of the applicability of several simulation software. Final report.” Department of Building Physics, Indoor Climate and Building Services, Belgian Building Research Institute, Bélgica, 2004.

- Grabe, J. *A prediction tool for the temperature field of double facades. Energy and Buildings*. 2002.
- Hendriks, L., e H Hens. “Building Envelopes in a holistic perspective - Methodology, final report.” Belgium, 2000.
- Jensen, R., O. Kalyanova, e P. Heiselberg. “Building Physics 2008 - 8th Nordic Symposium: Modeling a Naturally Ventilated Double Skin Facade with a Building Thermal Simulation Program.” Aalborg University, Aalborg, Denmark, 2008.
- Kreith, F. *Mechanical Engineering Handbook - Heat and Mass Transfer*. Boca Raton: CRC Press, 1999.
- Lancour, X., A. Deneyer, M. Blasco, G. Flamant, e P. Wouters. “Ventilated Double Facades - Classification and Illustration of facade concepts.” Department of Building Physics, Indoor Climate and Building Services, Belgian Building Research Institute, Belgica, 2004.
- Lee, E., S. Selkowitz, V Bazjanac, V. Inkarojrit, e C. Kohler. “High-performance commercial building facades.” Environmental Energy Technologies Division, University of California, Berkeley, CA, 2002.
- Marques da Silva, F., e J. Gosselin. “Advanced Integrated Façades - State of the Art.” Energy Conservation in Buildings and Community Systems, International Energy Agency, 2005.
- Oesterle, E., R. Lieb, M. Lutz, e W. Heusler. *Double-Skin Facades: Integrated Planning. building physics, construction, aerophysics, air-conditioning, economic viability*. Munich: Prestel, 2001.
- Poirazis, H. “Double Skin Façades: A literature review.” Department of Architecture and Built Environment, Division of Energy and Building Design., Lund University, Lund Institute of Technology, Lund, Sweden, 2006.
- Roth, K., T. Lawrence, e J. Brodrick. “Emerging Technologies: Double-Skin Façades.” *ASHRAE Journal* (American Society of Heating, Refrigeration and Air-Conditioning Engineers, Inc.), Outubro 2007.
- Saelens, D. “Energy Performance Assessments of Single Storey Multiple-Skin Facades. PhD thesis.” Laboratory of Building Physics, Department of Civil Engineering, Catholic University of Leuven, Belgium, 2002.
- U.S. Department of Energy. *Building Technologies Program*. 2009.
<http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/> (acedido em 22 de Maio de 2009).
- Uuttu, S. “Study of Current Structures in Double-Skin Facades. MSc thesis in Structural Engineering and Building Physics.” Department of Civil and Environmental Engineering, Helsinki University of Technology, Finland, 2001.

Wigginton, M., e J. Harris. *Intelligent Skins*. Jordan Hill, Oxford: Butterworth-Heinemann, 2002.

Yazdanian, M, e J. Klems. *Measurement of the Exterior Convective Film Coefficient for Windows in Low-rise Buildings* . ASHRAE Transactions, Vol. 100, Part 1, p. 1087 - 1096, 1994.