



**Joaquim Mayer Botelho da Silva**

Licenciado em Ciências de Engenharia Civil

# **A ventilação natural como melhoria do desempenho energético de edifícios residenciais**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre  
em Engenharia Civil - Perfil Construção

Orientador: Daniel Aelenei, Professor Doutor da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa

Co-Orientador: Armando dos Santos Pinto, Assistente de Investigação do Laboratório Nacional de Engenharia Civil

Júri:

Presidente: Professor Doutor Fernando Manuel Anjos Henriques

Arguente: Professora Doutora Maria da Glória Gomes

Vogais: Professor Doutor Daniel Aelenei  
Doutor Armando dos Santos Pinto



FACULDADE DE  
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

Junho 2012



“Copyright” Joaquim Mayer Botelho da Silva, FCT/UNL e UNL

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa tem o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objectivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.



# Agradecimentos

Gostaria de agradecer ao Professor Doutor Daniel Aelenei, pelo estímulo, orientação e disponibilidade demonstrados ao longo do período de elaboração deste trabalho.

Deixo um agradecimento ao Professor Armando Pinto, pelo apoio técnico imprescindível que me facultou em momentos chave do trabalho e que permitiram solucionar diversas adversidades que foram surgindo ao longo da sua realização.

Como a conclusão deste trabalho é o finalizar de uma etapa da vida, gostaria de agradecer a todos os amigos que me acompanharam e ajudaram de alguma forma não só na conclusão deste trabalho como ao longo de todo o percurso académico em especial ao Mário Delgado, ao João Correia, ao Pedro Gonçalves, à Célia Rodrigues, à Magda Carvalho, ao Rui Curveira, ao Miguel Peres e ao João Fernandes que me acompanharam e ajudaram com partilha de ideias e de maravilhosos momentos ao longo destes últimos anos.

À Companhia de Teatro de Almada que me proporcionou tempo e espaço para conciliar o trabalho com os estudos.

Aos meus pais, irmã, avó e Dineia um agradecimento especial por todo o apoio e motivação que me têm dado ao longo da minha vida.



# Resumo

A eficiência energética é um tema de elevada importância. Segundo a Organização das Nações Unidas, a população mundial será de 8,5 milhares de milhões de habitantes em 2025 com tendência a aumentar exponencialmente. Mantendo o estilo de vida actual, esta evolução demográfica causará incondicionalmente uma forte urbanização nas áreas periféricas das cidades, exercendo uma enorme pressão nos recursos disponíveis e aumentando a poluição ambiental. Com esta problemática surge a necessidade de no ramo da construção tornar os edifícios sustentáveis.

Este trabalho centra-se no estudo dos parâmetros que influenciam a ventilação natural ao nível do desempenho energético de edifícios residenciais, com o objectivo de identificar estratégias de melhoria de comportamento térmico e QAI. Para a obtenção de resultados recorre-se ao programa computacional *EnergyPlus*, ferramenta de simulação de comportamento térmico de edifícios, e a dois apartamentos com configurações distintas designados por modelos.

As variáveis alteradas no estudo destes modelos são referentes a propriedades dos modelos (orientação, altura base, elementos construtivos), a propriedades da envolvente exterior (região climática, rugosidade do terreno), aos hábitos ocupacionais e aos diferentes tipos de ventilação. Neste trabalho estuda-se a ventilação transversal e a unilaterial, ambas com afectação do gradiente de temperatura.

Os resultados obtidos ao longo deste trabalho permitem concluir que a configuração dos modelos não interfere na tendência dos resultados e que não existe uma solução geral para todos os apartamentos tendo que se adaptar estratégias de ventilação diferentes para cada caso, por vezes, até mesmo dentro do mesmo edifício.

## Palavras-chave

**ventilação natural, estratégia, *EnergyPlus*, habitação**





# Abstract

Energy efficiency is a topic of high importance. According to the United Nations, world population will be 8.5 billion inhabitants in 2025 with a tendency to increase exponentially. Keeping the current lifestyle demographic change unconditionally causes a strong urbanization in peripheral areas of cities, exerting enormous pressure on available resources and increasing environmental pollution. With this issue comes the need for the construction sector make buildings sustainable.

This paper focuses on the study of parameters influencing natural ventilation at the level of energy performance of residential buildings with the aim of identifying strategies for improvement of thermal and IAQ. To obtain results we resort to computer program *EnergyPlus*, simulation tool thermal behavior of buildings and apartments with two separate settings referred to as models.

The variables changed in the study of these models are related to the properties of the models (orientation, height, base building elements), the properties of the outer casing (climatic region, roughness of the terrain), occupational habits and different types of ventilation. In this paper we study the transverse both unilateral and assign the temperature gradient.

The results obtained during this study showed that the configuration of the model does not affect the tendency of the results and there is no general solution to all the flats having to adapt to different strategies ventilation each case, sometimes even within the same building.

## Key-words

**simulation, natural ventilation, strategies, *EnergyPlus*, building**



# Índice de Matérias

<b>Copyright</b>	<b>3</b>
<b>Agradecimentos</b>	<b>5</b>
<b>Resumo</b>	<b>i</b>
<b>Abstract</b>	<b>iii</b>
<b>Índice de Figuras</b>	<b>ix</b>
<b>Índice de Tabelas</b>	<b>xi</b>
<b>Lista de abreviaturas, siglas e símbolos</b>	<b>xiii</b>
<b>1 Introdução</b>	<b>1</b>
1.1 Objectivos . . . . .	3
1.2 Estrutura do trabalho . . . . .	3
<b>2 Ventilação em edifícios</b>	<b>5</b>
2.1 Introdução . . . . .	5
2.2 Contextualização histórica . . . . .	5
2.3 Conceitos da ventilação natural . . . . .	7
2.3.1 Variáveis da ventilação . . . . .	8
2.3.2 Acção do vento na ventilação natural . . . . .	8
2.3.3 Acção térmica na ventilação natural . . . . .	11
2.3.4 Acção combinada do vento e do gradiente de temperatura . . . . .	13
2.3.5 Coeficientes de pressão . . . . .	13
2.3.6 Coeficiente de descarga . . . . .	16
2.3.7 Infiltração . . . . .	17
2.3.8 Ventilação transversal . . . . .	17
2.3.9 Ventilação unilateral . . . . .	18
2.4 Taxas de renovação de ar: Métodos . . . . .	18
2.5 Legislação da ventilação natural . . . . .	18
2.5.1 Conforto térmico . . . . .	19

<b>3</b>	<b>Modelos de cálculo</b>	<b>21</b>
3.1	Modelos de cálculo . . . . .	21
3.1.1	Modelos empíricos . . . . .	21
3.1.2	Modelos nodais . . . . .	26
3.1.3	Modelos CFD . . . . .	28
3.1.4	Técnicas de medição . . . . .	29
3.1.5	Modelos combinados . . . . .	31
3.1.6	Modelo nodal do <i>EnergyPlus</i> . . . . .	31
<b>4</b>	<b>Caso de Estudo</b>	<b>35</b>
4.1	Introdução . . . . .	35
4.2	Apartamentos e modelos nodais . . . . .	35
4.3	Caracterização do clima . . . . .	36
4.3.1	Temperatura exterior . . . . .	37
4.3.2	Velocidade e direcção do vento . . . . .	38
4.4	Ganhos internos . . . . .	39
4.4.1	Ocupação . . . . .	39
4.4.2	Iluminação . . . . .	40
4.4.3	Equipamentos . . . . .	43
4.5	Coeficientes de pressão . . . . .	45
4.6	Período de análise . . . . .	46
4.7	Envolvente exterior . . . . .	46
4.8	Análise de sensibilidade . . . . .	47
4.8.1	Zona climática . . . . .	47
4.8.2	Orientação do edifício . . . . .	48
4.8.3	Tipo de ventilação . . . . .	48
4.8.4	Duração do processo de ventilação . . . . .	49
4.8.5	Altura base . . . . .	49
4.8.6	Rugosidade aerodinâmica . . . . .	49
4.8.7	Elementos de vão . . . . .	50
4.9	Tratamento dos dados . . . . .	50
<b>5</b>	<b>Resultados</b>	<b>53</b>
5.1	Modelos base . . . . .	53
5.2	Influência da orientação . . . . .	54
5.3	Influência da rugosidade do terreno . . . . .	56
5.4	Influência do tipo de região . . . . .	57
5.5	Influência do período de ventilação . . . . .	59
5.6	Análise modo de ventilação . . . . .	61
5.6.1	Análise tipo de ventilação por zona . . . . .	64
5.7	Influência da altura base . . . . .	65
5.8	Influência dos materiais das janelas - Infiltração . . . . .	67
5.8.1	Coeficiente de fluxo . . . . .	68
5.8.2	Expoente de fluxo . . . . .	70
5.8.3	Comparação com ventilação induzida . . . . .	72
5.9	Influência classes de exposição . . . . .	73

*ÍNDICE DE MATÉRIAS*

vii

**6 Conclusões e desenvolvimentos futuros**

**79**

**Bibliografia**

**81**



# Índice de Figuras

1.1	Características de um edifício sustentável . . . . .	2
2.1	Badgir [18] . . . . .	6
2.2	Evolução das taxas de ventilação nos Estados Unidos da América[16] . . . . .	7
2.3	Pressão exercida pelo vento nas fachadas [22] . . . . .	9
2.4	Influência do perfil do vento . . . . .	11
2.5	Distribuição de pressões entre duas aberturas verticais a diferentes cotas [25] . . . . .	12
2.6	Fluxos de ar consoante as temperaturas . . . . .	12
2.7	Escoamento do fluxo de ar em torno de um edifício rectangular [6] . . . . .	13
2.8	Distribuição dos coeficientes de depressão numa superfície de um edifício ( $Cp_e \times 100$ ) (Devenport and Hui 1982) [6] . . . . .	14
2.9	Valores recomendados dos coeficientes de pressão exterior para paredes verticais dos edifícios de planta regular [22] . . . . .	15
2.10	Variação dos coeficientes de pressão médios numa parede para cada ângulo de incidência segundo Swami and Chandra[6] . . . . .	16
3.1	Ventilação unilateral provocada pelo vento . . . . .	24
3.2	Ventilação unilateral provocada pela diferença de temperatura . . . . .	24
3.3	Ventilação unilateral provocada pela diferença de temperatura com duas aberturas . . . . .	24
3.4	Ventilação transversal provocada pela acção do vento . . . . .	24
3.5	Ventilação transversal provocada pela acção do vento . . . . .	25
3.6	Ventilação cruzada provocada pela acção da temperatura e do vento . . . . .	25
3.7	Modelo Nodal . . . . .	26
3.8	Esquema da porta ventiladora[8] . . . . .	29
4.1	Modelos Nodais . . . . .	36
4.2	Direcção predominante do vento (1-Bragança; 2-Lisboa) . . . . .	37
4.3	Evolução da temperatura média diária exterior ao longo do ano . . . . .	38
4.4	Evolução da velocidade média diária do vento ao longo do ano . . . . .	38
4.5	Gráficos Ocupacionais . . . . .	40
4.6	Tipos de Luzes . . . . .	41
4.7	Gráficos Padrão de Iluminação - Sala . . . . .	42
4.8	Gráficos Padrão de Iluminação - Quartos Casal . . . . .	42
4.9	Gráficos Padrão de Iluminação - Quartos Solteiro . . . . .	42
4.10	Gráficos Padrão de Iluminação - Instalações Sanitárias . . . . .	43
4.11	Gráficos Padrão de Iluminação - Instalações Sanitárias . . . . .	43
4.12	Gráficos Padrão de Equipamento - Sala . . . . .	44

4.13	Gráficos Padrão de Equipamento - Quarto de Casal . . . . .	44
4.14	Gráficos Padrão de Equipamento - Quarto de Solteiro . . . . .	44
4.15	Gráficos Padrão de Equipamento - Cozinha . . . . .	45
4.16	Gráficos Padrão de Equipamento - Instalação Sanitária . . . . .	45
4.17	Orientações utilizadas - modelo 1 . . . . .	48
5.1	Renovações Horárias - Orientação . . . . .	54
5.2	Necessidades de Aquecimento - Orientação . . . . .	55
5.3	Necessidades de Arrefecimento - Orientação . . . . .	55
5.4	Renovações Horárias - Influência da Rugosidade . . . . .	56
5.5	Necessidades de Aquecimento - Influência da Rugosidade . . . . .	57
5.6	Necessidades de Arrefecimento - Influência da Rugosidade . . . . .	57
5.7	Renovações Horárias - Região . . . . .	58
5.8	Necessidades de Aquecimento - Região . . . . .	59
5.9	Necessidades de Arrefecimento - Região . . . . .	59
5.10	Renovações Horárias - Período de Ventilação . . . . .	60
5.11	Necessidades de Aquecimento - Período de Ventilação . . . . .	61
5.12	Necessidades de Arrefecimento - Período de Ventilação . . . . .	61
5.13	Renovações Horárias - Modo de Ventilação . . . . .	62
5.14	Necessidades de Aquecimento - Modo de Ventilação . . . . .	63
5.15	Necessidades de Arrefecimento - Modo de Ventilação . . . . .	63
5.16	Renovações Horárias - Modo de Ventilação por Zona . . . . .	64
5.17	Necessidades de Aquecimento - Modo de Ventilação por Zona . . . . .	64
5.18	Necessidades de Arrefecimento - Modo de Ventilação por Zona . . . . .	65
5.19	Renovações Horárias - Altura Base . . . . .	66
5.20	Necessidades de Aquecimento - Altura Base . . . . .	67
5.21	Necessidades de Arrefecimento - Altura Base . . . . .	67
5.22	Renovações Horárias - Configuração Janelas . . . . .	69
5.23	Necessidades de Aquecimento - Configuração Janelas . . . . .	69
5.24	Necessidades de Arrefecimento - Configuração Janelas . . . . .	70
5.25	Renovações Horárias - Expoentes de Fluxo de Materiais . . . . .	71
5.26	Necessidades de Aquecimento - Expoentes de Fluxo de Materiais . . . . .	71
5.27	Necessidades de Arrefecimento - Expoentes de Fluxo de Materiais . . . . .	72
5.28	Necessidades de Aquecimento - Comparação com Ventilação Induzida . . . . .	72
5.29	Necessidades de Arrefecimento - Comparação com Ventilação Induzida . . . . .	73
5.30	Renovações horárias - Classe de exposição I e II . . . . .	74
5.31	Necessidades Energéticas de Aquecimento - Classe de exposição I e II . . . . .	74
5.32	Necessidades Energéticas de Arrefecimento - Classe de exposição I e II . . . . .	75
5.33	Renovações horárias - Classe de exposição III e IV . . . . .	75
5.34	Necessidades Energéticas de Aquecimento - Classe de exposição III e IV . . . . .	76
5.35	Necessidades Energéticas de Arrefecimento - Classe de exposição III e IV . . . . .	77



# Índice de Tabelas

2.1	Variáveis atmosféricas em duas diferentes altitudes acima do nível do solo [28] . . . . .	8
2.2	Coeficientes de descarga para vários tipos de janela [24] . . . . .	17
4.1	Valores médios anuais das variáveis climatéricas referentes às zonas em estudo . . . . .	37
4.2	Energia por pessoa referente a cada actividade[28] . . . . .	40
4.3	Valores aproximados para Fracção que retorna para o ar, fracção radiante e fracção visível de acordo com a ASHRAE . . . . .	41
4.4	Coeficientes de pressão - <i>EnergyPlus</i> . . . . .	46
4.5	Materiais dos elementos construtivos . . . . .	47
4.6	Duração de Ventilação . . . . .	49
4.7	Variáveis <i>EnergyPlus</i> referentes à rugosidade aerodinâmica . . . . .	50
4.8	Coeficientes e Expoentes de Fluxo segundo material da Janela . . . . .	50
5.1	Parâmetros adoptados para o modelo base . . . . .	53
5.2	Resultados dos Modelos Base . . . . .	53
5.3	Coeficientes de Fluxo Analisados . . . . .	68
5.4	Materiais da esquadria das janelas analisados . . . . .	70



# Lista de abreviaturas, siglas e símbolos

## Abreviaturas

EC1 Eurocódigo 1

EC1-4 Eurocódigo 1 parte 4

NP 1037-1 Norma Portuguesa de Ventilação e evacuação dos produtos da combustão dos locais com aparelhos a gás - Parte 1

## Siglas

ASHRAE American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers

DL Decreto Lei

FCT Faculdade de Ciências e Tecnologia

IPQ Instituto Português da Qualidade

NP Norma Portuguesa

OMS Organização Mundial de Saúde

QAI Qualidade do ar interior

RCCTE Regulamento das Características do Comportamento Térmico dos Edifícios

RSA Regulamento de Segurança e Acções

SED Síndrome do Edifício Doente

SCE Sistema de Certificação Energética e Qualidade do Ar Interior de Edifícios

UNL Universidade Nova de Lisboa

## Símbolos

$A_n$  área de saída de ar segundo Aynsley

$A_0$  área de equivalente de aberturas segundo Irminger

$A$  área combinada de entrada e saída de fluxo de ar segundo Van Straaten

$A$  área efectiva das frechas do edifício segundo ASHRAE

- $A$  área da abertura segundo British Standards
- $b$  Coeficiente associado ao efeito do vento
- $C_a$  Coeficiente de descarga segundo Irmingier
- $C_d$  Coeficiente de descarga.
- $C_e$  Coeficiente de pressão na abertura de entrada segundo Irmingier
- $C_p$  Coeficiente de pressão
- $C_s$  Coeficiente de pressão na abertura de saída segundo Irmingier
- $H$  Altura entre cotas segundo British Standards
- $H$  Coeficiente de Escoamento - método do comprimento de fresta
- $N_{aquec}$  Necessidades de Aquecimento
- $N_{arref}$  Necessidades de Arrefecimento
- $p$  Pressão num ponto segundo método do comprimento de fresta
- $p_{ref}$  Pressão de referencia
- $Q$  Caudal segundo British Standards
- $R_{ph}$  Renovações horárias
- $T$  Temperatura
- $T_{int}$  Temperatura Interior
- $T_{ext}$  Temperatura Exterior
- $U_{met}$  Velocidade do vento medida na estação meteorológica
- $U_v$  Velocidade do vento segundo British Standards
- $v$  Caudal volúmico
- $v$  Velocidade do vento na abertura segundo Irmingier
- $v_{ref}$  Velocidade de referência
- $v_z$  Velocidade de referência ao nível da cobertura segundo Aynsley
- $\alpha$  Coeficiente associado ao gradiente de temperatura segundo ASHRAE
- $\beta$  Expoente de Escoamento
- $\phi$  Caudal volúmico
- $\rho$  densidade do ar
- $\Delta T$  Diferencial de Temperatura
- $\Delta p$  Diferencial de Pressão
- $\Delta C_p$  Diferencial de Coeficiente de descarga

# Capítulo 1

## Introdução

A maior relevância relacionada com o tema do consumo energético dos edifícios tiveram início em 1973, com a crise petrolífera e consequente subida dos preços dos combustíveis. Até esta data em todos os países ocidentais, especialmente na Europa, existiam poucas preocupações ao nível do uso racional de energia nos edifícios, dado esta área apresentar um baixo custo.

Decorrente desta crise os custos energéticos aumentaram, o que originou uma estratégia de redução dos consumos de energia (eléctrica, gás, etc) dos edifícios que prefazem anualmente cerca de 40% do consumo energético. As políticas energéticas desta época focavam-se em tornar o edifício num espaço hermético, aumentando o isolamento térmico do mesmo e diminuindo as infiltrações de ar, que eram as responsáveis pelo aumento da factura energética.

Porém, esta redução não teve em conta na sua grande maioria os efeitos secundários do isolamento térmico do edifício. Se por um lado o seu isolamento diminui o consumo energético, por outro a diminuição das infiltrações despromove indirectamente a qualidade do ar interior (QAI). Consequentemente, como resultado destas estratégias, verifica-se o aumento da humidade e o desenvolvimento de fungos e bolores no interior do edifício, que põe em causa a saúde dos ocupantes, o sobreaquecimento na estação de arrefecimento, a baixa taxa de renovação do ar interior.

Com a redução da QAI surge o conceito de "síndrome do edifício doente" (SED). O SED refere-se à relação entre causa e efeito das condições ambientais em áreas internas, com reduzida renovação de ar e os vários níveis de agressão à saúde dos seus ocupantes através de fontes poluentes de origem física, química e microbiológica [1]. Considera-se que o edifício apresenta esta síndrome se parte dos seus ocupantes apresentarem sintomas transitórios associados ao tempo de permanência no seu interior, que tendem a desaparecer após curtos períodos de afastamento. Os principais sintomas são a irritação dos olhos, nariz, pele e garganta, dores de cabeça, falta de concentração, entre outros. A Organização Mundial de Saúde (OMS) estimou que cerca de 30% dos edifícios, novos ou reabilitados, de todo o mundo são alvo de problemas de qualidade do ar interior em condições temporárias ou até longas [2].

Por vezes, os problemas da qualidade do ar interior resultam da carência de atenção na parte de projecto ou das actividades dos ocupantes [23]. Assim, o SED lembrou muitos engenheiros, arquitectos e políticos que uma das funções de um edifício é proporcionar conforto térmico aos seus ocupantes durante as alterações climáticas do exterior e garantir um espaço interior saudável e confortável.

Em 1990 inicia-se de uma forma global a era da eficiência energética. Nesta alteração de pensamento ficou claro que, a conservação de energia tem de andar lado a lado com o ambiente exterior e interior e

que o conceito global de um edifício surge associado aos aspectos ambientais. Estes aspectos apelam à necessidade de uma integração total das características do local, da orientação e do *design*, para que se possa aplicar técnicas passivas para a climatização do seu interior.

Numa visão integrada de todos estes conceitos surge o edifício sustentável, ou "verde", baseado numa construção sustentável. A definição aceite foi a apresentada por Charles Kibert em 1994, que define a construção sustentável como a "criação e gestão responsável de um ambiente, construído saudavelmente, tendo em consideração os princípios ecológicos (por forma a evitar danos ambientais) e a utilização eficiente dos recursos"[29].

Os edifícios sustentáveis são aqueles que garantem um ambiente confortável e saudável aos seus ocupantes, tendo em vista as suas necessidades para execução de determinadas actividades, sem por em causa os sistemas ambientais nem o uso excessivo e inadequado de energia. Para um edifício ser sustentável tem que ser ecologicamente correcto, economicamente viável, socialmente justo e culturalmente diverso. A sustentabilidade ecológica tem como foco principal a protecção do ecossistema dos problemas actuais e futuros, de modo a garantir condições de habitabilidade, beleza ambiental e manter a sua função como fonte de energias renováveis. A sustentabilidade económica faz com que se tenha em conta factores ambientais e ecológicos aceites socialmente no balanço económico, de forma a que o lucro não seja apenas medido na sua vertente financeira, mas também na sua vertente social e ambiental, de modo a maximizar as características das matérias-primas e dos recursos humanos, evitando gastos desnecessários. Por último, a sustentabilidade sociocultural tem como objectivo optimizar o conforto dos utilizadores dos edifícios, desencorajar a exclusão social e preservar os valores sociais e culturais. Deste modo, conclui-se que a construção sustentável assenta sobre três grandes pilares, a eficiência energética, o conforto térmico dos utilizadores do edifício e a qualidade do ar interior.

A energia é um bem essencial e indispensável ao ser humano, para desenvolver grande parte das suas actividades. No entanto, apesar de existir uma grande preocupação global com os consumos energéticos, a produção de energia tem aumentado constantemente nos últimos anos, a par com a preocupação da eficiência energética.

A eficiência energética tem um papel fundamental nas políticas energéticas europeias, nomeadamente, na competitividade das empresas e na satisfação dos compromissos do Protocolo de Quioto, para a redução de gases com efeito estufa. Em Portugal o sector habitacional é responsável por 25% do consumo final de energia eléctrica, sendo uma grande parte atribuída à climatização das habitações

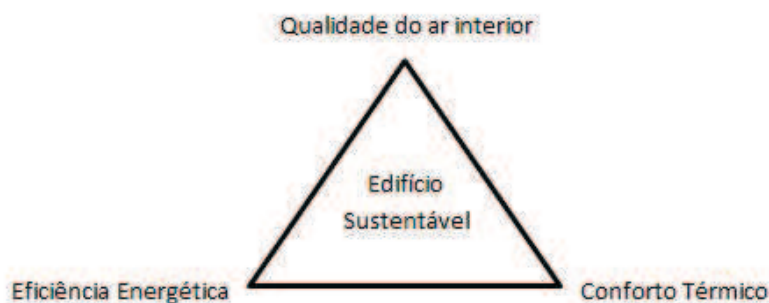


Figura 1.1: Características de um edifício sustentável

As alterações socioeconómicas e a evolução dos materiais de construção ocorridas nos últimos 30 anos em Portugal, com destaque na presença feminina no mercado laboral, as famílias serem menos numerosas e a substituição dos elementos de vão em madeira por materiais mais estanques, provocaram modificações nos hábitos de vida da população e na qualidade do ar interior. Desta forma, as habitações passam a maior parte do tempo desabitadas e a abertura de janelas ou portas, destinadas a ventilar os compartimentos, deixaram de ser feitas com tanta frequência e as frechas naturais entre os elementos da fachada que naturalmente ventilavam as habitações deixaram de existir.

A legislação portuguesa com referências à ventilação natural compreende o Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios [RCCTE] [11] e a norma portuguesa NP 1037-1 [17]. O RCCTE determina para fracções autónomas de edifícios de habitação, uma taxa de ventilação mínima de 0,6 renovações de ar por hora. A norma portuguesa que estabelece as regras dos sistemas de ventilação natural para edifícios de habitação recomenda a instalação de dispositivos de entrada de ar nos compartimentos principais. Tendo em atenção a construção em Portugal, nota-se que esta última recomendação não tem sido levada em conta, o que remete à preocupação das taxas de renovação de ar das habitações e consequentes gastos energéticos para manter o conforto dos seus habitantes.

## 1.1 Objectivos

Este trabalho tem o objectivo de identificar estratégias de melhoria de comportamento térmico e QAI de edifícios de habitação através do estudo de efeitos dos parâmetros que influenciam a ventilação natural e o desempenho energético de edifícios residenciais como a cota do apartamento, a sua orientação, a rugosidade do terreno, zona climática, tipo de ventilação, período de ventilação e a permeabilidade de ar nas janelas. Para a obtenção de resultados recorre-se ao programa computacional *EnergyPlus*, ferramenta de simulação de comportamento térmico de edifícios e a dois apartamentos com configurações distintas com o objectivo de verificar se as alterações ocorrem de forma semelhante em ambos os modelos.

## 1.2 Estrutura do trabalho

A presente dissertação encontra-se dividida em 6 capítulos de acordo com o discriminado nas seguintes linhas.

No presente capítulo realiza-se uma introdução do trabalho e descreve-se os objectivos e em conclusão apresenta-se uma breve descrição da estrutura do trabalho.

O segundo capítulo aborda as matérias introdutórias efectuando uma contextualização histórica da ventilação natural em edifícios, descreve as principais variáveis externas associadas à ventilação natural, as suas alterações e influências no caso de estudo ao nível térmico assim como os parâmetros associados aos elementos envidraçados e coeficientes de pressão. Também é feita uma descrição de alguns tipos de ventilação natural concluindo com um resumo dos documentos legais associados ao tema.

No capítulo terceiro é efectuado uma abordagem dos vários modelos existentes para o cálculo dos fluxos de ar de admitidos no interior no edifício descrevendo alguns dos modelos empíricos e técnicas de medição concluindo este capítulo com a descrição do tipo de modelo utilizado ao longo do trabalho.

No capítulo quatro é realizada uma discussão dos casos de estudo assim como a apresentação do clima em cada zona de estudo. Neste capítulo também é efectuada a explicação dos parâmetros iniciais e descrição dos parâmetros alterados ao longo das simulações.

O quinto capítulo expõe os resultados obtidos e respectivas leituras dos valores sendo as conclusões do trabalho apresentadas no capítulo seis.



## Capítulo 2

# Ventilação em edifícios

### 2.1 Introdução

No presente capítulo é feita a introdução dos principais conceitos associados à ventilação dos edifícios habitacionais. No subcapítulo 2.2 é apresentada uma contextualização histórica sobre ventilação e conforto térmico de edifícios. Nos subtópicos seguintes descreve-se a ventilação natural em edifícios assim como os conceitos fundamentais da ventilação.

### 2.2 Contextualização histórica

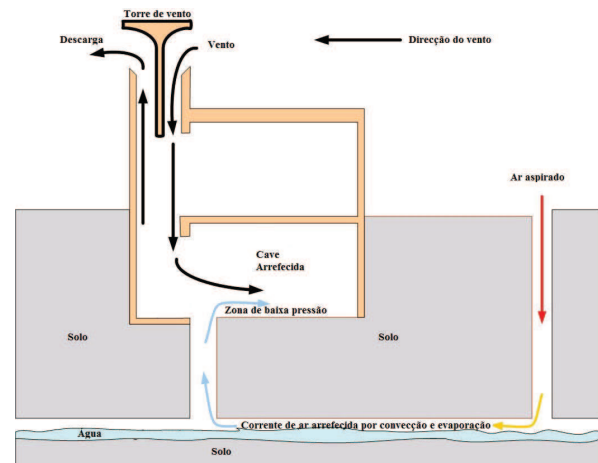
Ao longo do tempo o desenvolvimento das estratégias de conforto higrotérmico passaram por diversos níveis, começando pelas simples e intuitivas aplicações de técnicas de arrefecimento natural, sombreamento, arrefecimento por evaporação e circulação de ar até aos meios mecânicos conhecidos baseados em ciclos de refrigeração.

De facto, nos últimos anos tem havido um retorno na utilização de várias técnicas bem conhecidas que eram aplicadas nos primeiros períodos da civilização. Os princípios da ventilação são os mesmos, porém com aplicação de tecnologias modernas podendo assim adaptarem-se a quase todos os edifícios retirando os melhores resultados possíveis.

A ventilação natural era utilizada nos países quentes para manter as temperaturas da habitação dentro de valores confortáveis. No Médio Oriente a ventilação era garantida por torres eólicas com o nome de "badghir", tendo este sistema sido utilizado durante o primeiro milénio, figura 2.1. O funcionamento deste mecanismo consiste no aproveitamento do efeito de sucção causado pelas pressões negativas existentes nas zonas superiores do edifício, onde os ventos são mais intensos a existência de uma abertura a uma cota mais baixa que gera um fluxo de ar ascendente, que ao passar pelas massas de água arrefece as massas de ar interiores e também pela entrada de ar pelas aberturas existentes nas zonas superiores.



(a) Torre eólica (Badgir)



(b) Esquema do princípio de funcionamento do sistema

Figura 2.1: Badgir [18]

Nas construções dos séculos XVIII e XIX onde as técnicas de ventilação natural tinham como principal objectivo aproveitar as brisas frescas de Verão, existindo aberturas nas fachadas de barlavento de modo a promover a admissão de ar fresco, era bastante comum a existência de compartimentos interiores de tamanho reduzido o que dificultava a ventilação dos mesmos. Nesta época a ventilação era essencial para remover os fumos produzidos pelas lareiras e fogões a lenha[16].

No período após a Segunda Grande Guerra, com o desenvolvimento económico e tecnológico começa-se a instalar de forma intensiva os aparelhos de climatização. Nos anos 60 é fundada a ASHRAE, que se torna na principal referência mundial em estudos de sistemas de aquecimento, arrefecimento e ventilação. Os dois principais documentos sobre ventilação emitidos por esta entidade são as normas 55 e 62, que estão orientadas para a ventilação mecânica de espaços interiores.

A crise petrolífera de 1973 veio modificar a visão sobre o consumo dos recursos energéticos não renováveis. A noção de poupança energética na estratégia de climatização dos edifícios começou a ser considerada como estratégia alternativa aos sistemas mecânicos. Neste contexto, a ventilação natural volta a ser tida em conta adoptando sistemas mistos com o objectivo de reduzir a factura energética. Surgem nesta época duas normas emitidas pela ASHRAE, principal referência mundial de sistemas de aquecimento, arrefecimento e ventilação

Em Portugal a mudança do estilo de vida das últimas décadas levou a que as famílias estejam a maior parte do tempo fora de casa não existindo assim, como era comum, ventilação da habitação promovida por abertura de janelas e portas ao longo do dia. Ao mesmo tempo, com o avanço tecnológico foram desenvolvidas caixilharias mais permeáveis diminuindo as infiltrações entre elementos. Nesta época também se torna comum a utilização de exaustor sobre o fogão fazendo com que quando este aparelho está desligado, o valor das renovações de ar seja perto de zero.

Ao longo do tempo sempre houve preocupação em estabelecer valores mínimos para os caudais de admissão. A figura 2.2 mostra a evolução dos valores de taxa de ventilação recomendada para edifícios nos Estados Unidos da América, entre 1836 e 1996.

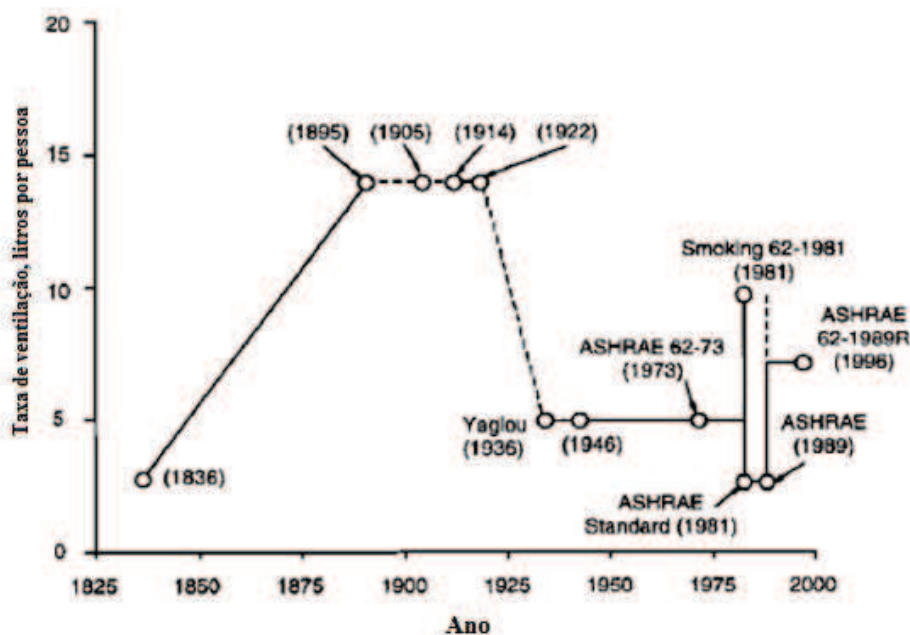


Figura 2.2: Evolução das taxas de ventilação nos Estados Unidos da América[16]

Como se pode observar a partir da figura 2.2 os valores mínimos representados variam ao longo do tempo consoante certos factores como o tipo de concepção dos edifícios, desenvolvimento tecnológico, custo de energia, legislação e alteração do estilo de vida, estado de conhecimento das questões de saúde.

### 2.3 Conceitos fundamentais relacionados com a ventilação natural

A ventilação em edifícios é o processo pelo qual é introduzido uma quantidade de ar novo no interior de uma zona e retirado o ar poluído para o exterior da mesma. A ventilação natural ocorre devido aos diferenciais de pressão entre duas zonas, o que provoca um movimento da massa de ar da zona de menor pressão para a zona de maior pressão. Estes fenómenos ocorrem do mesmo modo em várias escalas, desde a superfície terrestre com movimentos de grandes massas de ar características de cada zona do globo até à interacção vento/edifício. Também pode considerar-se uma escala regional e uma local que têm como variáveis a rugosidade do território e a sua localização marítima ou continental e a influência da existência de urbanização, florestas ou grandes massas de água.

No presente trabalho, apenas é abordada a ventilação a uma pequena escala, prosseguindo assim apenas com conceitos referentes à interacção vento/edifício.

Os factores naturais que promovem os diferenciais de pressão entre zonas de edifícios são, a temperatura, o vento e a pressão atmosférica, sendo esta última desprezada pois só é relevante a altitudes superiores às que a maior parte dos edifícios existentes apresentam. O processo da ventilação natural tem como principal objectivo promover a salubridade do ar que os ocupantes do edifício respiram. Segundo as normas em vigor, um sistema de ventilação deve garantir um fornecimento de ar que seja adequado ao metabolismo humano e que garanta a ocorrência de combustão completa no processo de queima de combustível, de modo a manter os valores de concentrações de poluentes inferiores aos valores de

referência [28]. Os poluentes provenientes das actividades humanas e relativos aos materiais existentes no local têm de ser extraídos do seu interior, de modo a manter os valores de concentração inferiores aos valores de referência. A ventilação de um edifício ainda tem a função de remover o excesso de carga térmica gerada pelos equipamentos existentes no interior e dos seus ocupantes (pessoas e/ou animais), assegurar as condições de humidade relativa de modo a evitar condensações e minimizar o movimento de massas de ar que causem sensação de desconforto aos ocupantes.

A ventilação de um edifício pode ser obtida através de meios naturais ou com auxílio de meios mecânicos. A ventilação natural é o fluxo de ar produzido pelos diferenciais de temperatura e pressão existentes em janelas, portas ou qualquer outra passagem com comunicação entre o exterior e interior do edifício. A ventilação mecânica ou ventilação forçada é o fluxo de ar admitido no edifício com auxílio de extractores e ventiladores que funcionam a energia eléctrica. Quando os dois sistemas coexistem numa mesma zona a ventilação é designada por híbrida.

Na construção de um edifício, e devido ao uso de diversos materiais, é inevitável que não existam fendas por onde passam pequenas quantidades de ar não dimensionadas. A esta quantidade de ar chama-se infiltração.

### 2.3.1 Variáveis da ventilação

Todos os edifícios estão localizados na troposfera, a camada mais baixa da atmosfera. A troposfera é a camada que se estende desde o nível médio das águas do mar até à altitude média de 11 km. A temperatura e a pressão atmosférica diminuem de forma distinta consoante o aumento de altitude. A variação da temperatura do ar é quase linear e designa-se por taxa gradiente adiabático ambiental, variando em valores médios 1° C por cada 150m. Por sua vez a pressão atmosférica diminui de forma mais lenta, podendo em certos casos, a sua variação ser desprezada. Por outro lado a velocidade do vento aumenta significativamente com a altitude [28]. Como se pode observar em seguida, na tabela 2.1 o vento é a variável que mais altera com o aumento de altitude.

Tabela 2.1: Variáveis atmosféricas em duas diferentes altitudes acima do nível do solo [28]

Variáveis	1,5 m	284 m	Diferença absoluta	Diferença percentagem
Temperatura do ar [°C]	15,0	13,2	1,9	12,3
Pressão atmosférica [Pa]	101,3	97,9	3,4	3,3
Velocidade do vento [m/s-1]	2,5	7,8	5,3	215,0

Assim, pode concluir-se que para a grande maioria dos edifícios, as variáveis naturais condicionantes à troca de massas de ar são a velocidade do vento e a temperatura. O efeito do vento provoca pressões positivas numa fachada (fachada onde incide o vento) e pressões negativas nas restantes como se pode observar no subcapítulo 2.3.2, e o diferencial de temperatura origina uma variação de pressão devida ao gradiente de densidade do ar resultante de diferentes temperaturas interior/exterior.

### 2.3.2 Acção do vento na ventilação natural

O vento é uma grandeza que varia no tempo e no espaço de forma imprevisível, tornando-se assim difícil representar um valor exacto para cada caso. A acção do vento sobre um edifício é representada

por um conjunto de pressões ou forças, que dependem essencialmente da intensidade do vento, condição dependente da zona onde está inserida a construção, da forma arquitectónica do edifício e sua orientação, condição dependente do edifício, que altera os coeficientes de pressão e exposição aos fluxos de ar. De um modo geral pode dizer-se que a fachada onde o vento predominante incide tem pressões positivas e as restantes negativas.

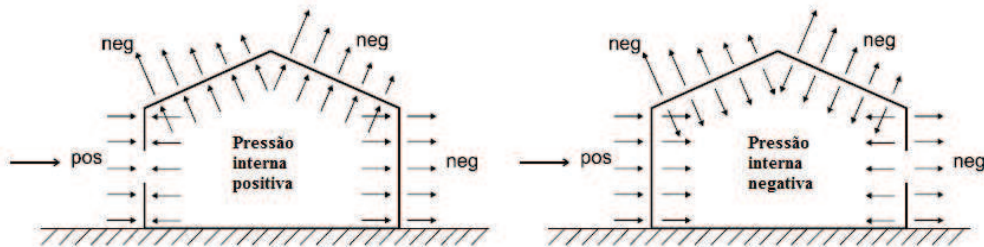


Figura 2.3: Pressão exercida pelo vento nas fachadas [22]

Para que exista uma movimentação entre o interior e o exterior do edifício, é necessário que existam diferenças de pressão entre a zona exterior e a interior das aberturas existentes. Estas pressões dependem dos coeficientes de pressão que são dependentes por sua vez da geometria do edifício.

A forma aconselhada pelas normas europeias para o cálculo das pressões parte da consideração de um princípio estático na equação de Bernoulli:

$$\frac{v^2}{2} + h + \frac{p}{\rho} = C \quad (2.1)$$

Onde  $v$  é a velocidade do vento,  $h$  é a cota a partir de um determinado referencial,  $\rho$  é a massa específica do ar e  $p$  é a pressão.

Assim ao considerar-se dois pontos, um muito longe da fachada, ponto 1, e outro muito perto, ponto 2, tem-se:

$$\frac{v_1^2}{2} + h + \frac{p_1}{\rho} = \frac{v_2^2}{2} + h + \frac{p_2}{\rho} \quad (2.2)$$

Considerando que os dois pontos estão à mesma cota, que a velocidade do ponto 1 é igual à pressão atmosférica e que a velocidade do ponto 2 é  $v_1$  tem-se que:

$$\frac{v_1^2}{2} = \frac{p_2}{\rho}, \quad (2.3a)$$

$$p_2 = \frac{1}{2}v_1^2. \quad (2.3b)$$

No estudo da ventilação natural em edifícios esta pressão é afectada por um coeficiente  $cp_e$ , coeficiente de pressão exterior, que pode ser obtido através de diversos métodos

### Velocidade do vento

A velocidade e a direcção do vento, para estudos de ventilação natural, são obtidas através de ficheiros climáticos. Estes ficheiros contêm valores obtidos através de estações meteorológicas, que estão situadas a maior parte das vezes em zonas distintas das do edifício, apresentando assim características diferentes em altura, rugosidade do terreno, exposição ao vento e objectos vizinhos. Tendo em conta que na equação 2.3b, equação que define as pressões exercidas pelo vento num determinado ponto, a variável vento aparece ao quadrado, podem existir erros significativos se não houver aproximação de valores. Assim sendo, as velocidades dos ventos podem ser aproximadas para as zonas em estudo através de diversas equações aconselhadas por normas (EC1-4 e BS5925:2001) ou documentos especializados (ASHRAE, 2003). As equações 2.4 , 2.5 e 2.6 permitem obter uma aproximação das velocidades do vento para diversas zonas tendo em conta a rugosidade do terreno, e a altura do edifício.

$$U_z = U_m k z^a \quad (2.4)$$

A equação 2.4 é referente à norma britânica. Onde  $U_z$  é a velocidade do vento à altura do edifício,  $U_m$  é a velocidade do vento para uma altura de 10m numa zona sem obstáculos,  $z$  é a altura do edifício e  $k$  e  $a$  são variáveis dependentes do terreno.

$$U_H = U_{met} \cdot \left( \frac{\delta_{met}}{H_{met}} \right)^{\alpha_{met}} \cdot \left( \frac{H}{\delta} \right)^{\alpha} \quad (2.5)$$

A equação 2.5 é referente ao ASHRAE *handbook*. Onde  $\delta$  é a espessura da camada limite do vento,  $\alpha$  é o expoente para o terreno local da edificação  $\delta_{met}$  é a espessura da camada limite do vento na estação meteorológica e  $\alpha_{met}$  é o expoente para o terreno local na estação meteorológica.

$$v_m(z) = c_r(z) \cdot c_o(z) \cdot v_b \quad (2.6)$$

A equação 2.6 é referente ao eurocódigo. Onde  $c_z(z)$  é o coeficiente de rugosidade,  $c_o(z)$  é o coeficiente de orografia e  $v_b$  é a velocidade base. Todos estes valores estão definidos em anexo nacional.

A imagem 2.4 apresenta, a título de exemplo, a influência do perfil do vento e das características do terreno na velocidade do vento local.

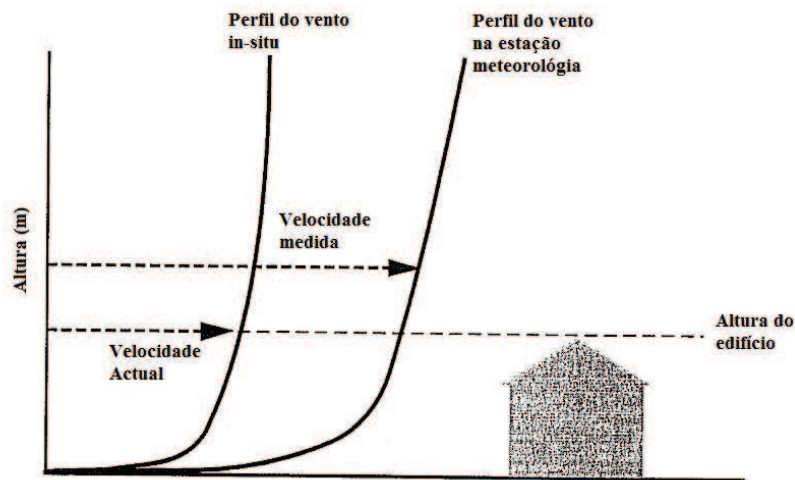


Figura 2.4: Influencia do perfil do vento

### 2.3.3 Acção térmica na ventilação natural

A existência de aberturas a diferentes cotas que promovem a comunicação entre o interior e o exterior do edifício e a diferença de temperaturas entre as duas zonas, induzem uma diferença de pressão que pode ser calculada pela expressão 2.7:

$$\Delta p_h = T_0 \cdot g \cdot h \cdot \rho_0 \cdot \left( \frac{1}{T_{ext}} - \frac{1}{T_{int}} \right) \quad (2.7)$$

Onde  $h$  é a diferença de cotas entre as linhas médias das aberturas,  $\rho_0$  é a densidade do ar a  $273K$ ,  $g$  é a aceleração da gravidade e  $T_{int}$ ,  $T_{ext}$ ,  $T_0$  são as temperaturas interior, exterior e de referência respectivamente.

Na seguinte figura, pode observar-se um diagrama representativo das pressões causadas pela acção térmica entre duas aberturas situadas em diferentes cotas.

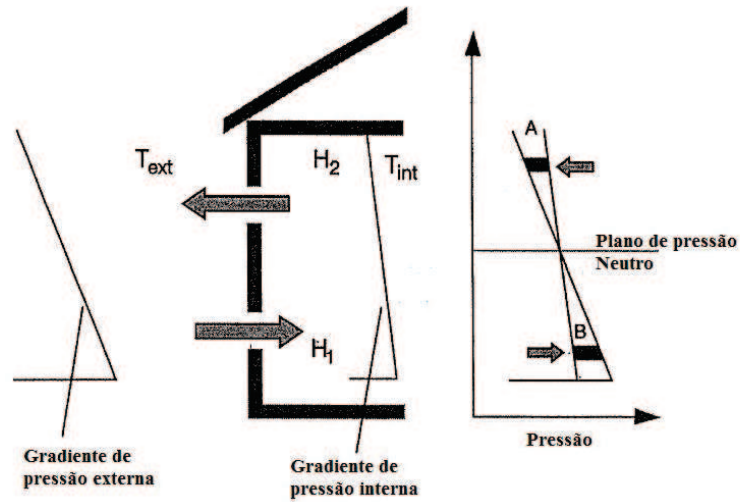
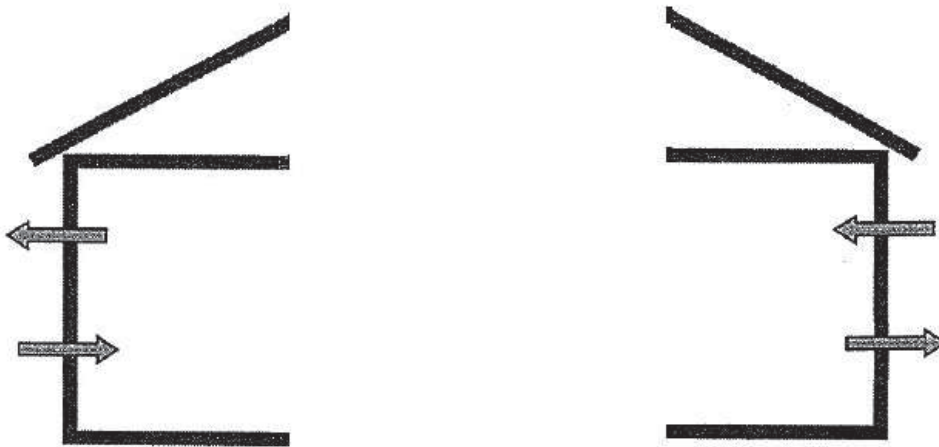


Figura 2.5: Distribuição de pressões entre duas aberturas verticais a diferentes cotas [25]

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



(a) Fluxo na estação de aquecimento  $T_{int} > T_{ext}$

(b) Fluxo na estação de arrefecimento  $T_{ext} > T_{int}$

Figura 2.6: Fluxos de ar consoante as temperaturas

Estes movimentos provocados pela acção térmica ocorrem nas aberturas previamente dimensionadas e nas frechas entre elementos construtivos.



### 2.3.4 Acção combinada do vento e do gradiente de temperatura

A acção combinada do vento e do gradiente de temperatura como o nome indica tem em conta as duas acções em simultâneo, de maneira a garantir que a sobreposição de efeitos destas variáveis não sobredimensionam nem subdimensionam os valores dos caudais de ventilação. Na prática, é complicado garantir que a combinação das acções anteriormente referidas mantenha, ao longo do tempo, caudais dentro dos valores recomendados. A acção térmica apenas promove uma ventilação eficaz quando o diferencial de temperatura média entre as duas zonas (interior e exterior) é superior a  $8^{\circ}\text{C}$ . Nos restantes períodos do ano, considera-se que a acção do vento garante as admissões de ar mínimas para o interior do edifício.

### 2.3.5 Coeficientes de pressão

O coeficiente de pressão é uma quantidade adimensional que descreve a pressão relativa através de um campo de fluxo em dinâmica de fluídos [7]. Sempre que se refere escoamento de fluídos, os coeficientes de pressão estão presentes.

Neste trabalho apenas serão apresentados conceitos referentes a coeficientes de pressão em edifícios. De uma forma mais simples, pode dizer-se que os coeficientes de pressão indicam as diferenças entre pressões externas de um sólido. Num edifício, estes coeficientes apresentam valores positivos ou negativos dependendo se a pressão local é superior ou inferior à pressão atmosférica.

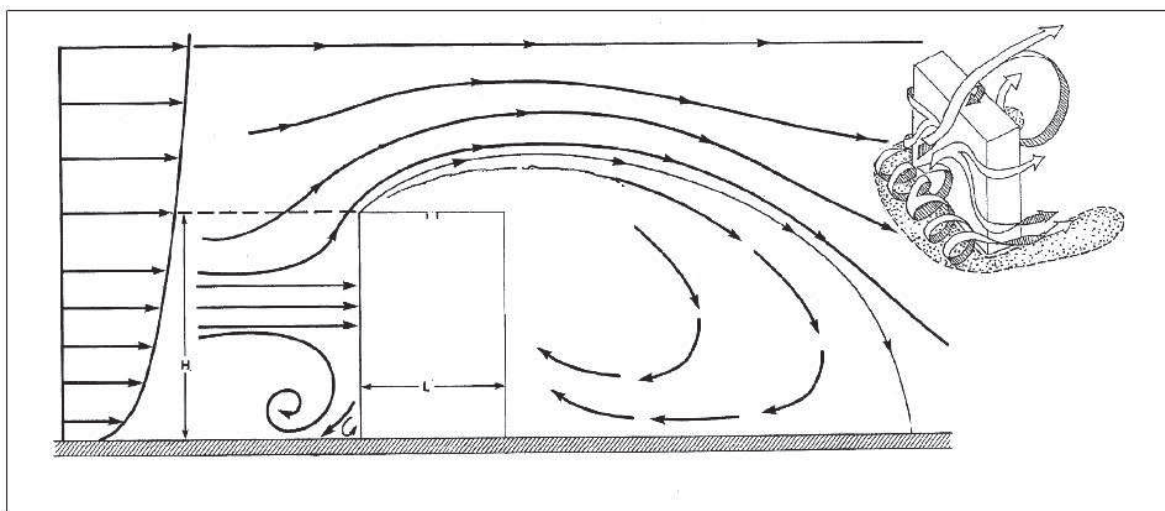


Figura 2.7: Escoamento do fluxo de ar em torno de um edifício rectangular [6]

No caso dos edifícios os coeficientes de pressão variam com a direcção do vento, a topografia, a rugosidade do terreno e obstáculos vizinhos [19]. Tendo em conta todas estas variáveis só é possível obter resultados precisos recorrendo à utilização do túnel de vento ou de modelos numéricos do tipo CFD (*Computational Fluid Dynamics*) justificando apenas a sua utilização para edifícios especiais ou para certos casos de estudo. Na figura 2.7 observa-se o modo como o vento incide numa fachada de um edifício.

Quando o vento incide numa fachada, o fluxo de ar é separado pelas arestas do edifício, causando pressões nas fachadas onde o vento embate e supressões em zonas das fachadas subjacentes, próximas às

arestas que separam o fluxo. Considerando os mesmos princípios, as pressões nas coberturas dependem da geometria das mesmas. Os valores dos coeficientes de pressão são bastante importantes num sistema de ventilação pois, uma fachada com valores positivos é uma zona aconselhável para a colocação das aberturas de admissão, enquanto uma fachada com coeficientes negativos é preferencialmente utilizada para a colocação de aberturas de extracção de ar poluído.

Para os casos correntes, os coeficientes de pressão estão tabelados em bibliografia especializada, *ASHRAE handbook*, eurocódigos e em documentos regulamentares como o RSA. Este tipo de bibliografia fornece um único valor para cada fachada do edifício, que para o estudo da ventilação natural não é conveniente pois pretende-se saber o valor do coeficiente de pressão na fachada em relação à direcção do vento.

Na figura 2.8, observa-se a distribuição dos coeficientes depressão do vento, para cada ângulo de incidência, numa superfície de um edifício.

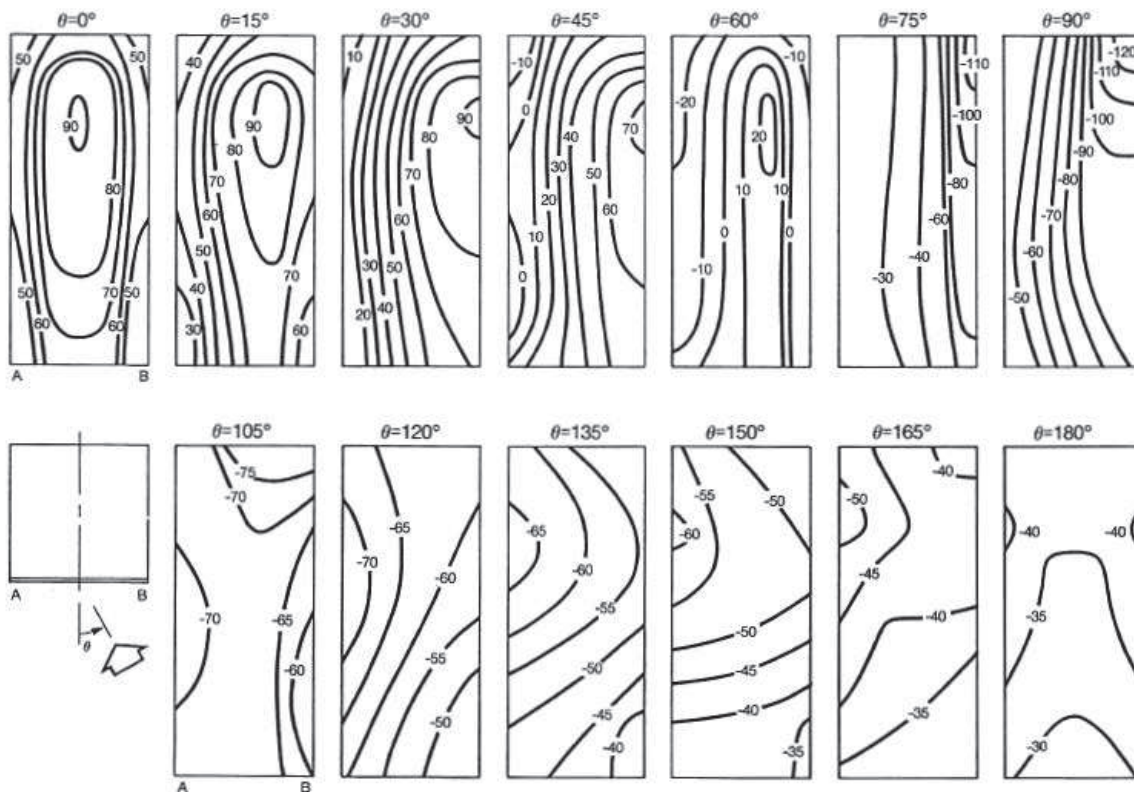


Figura 2.8: Distribuição dos coeficientes depressão numa superfície de um edifício ( $C_{pe} \times 100$ ) (Devenport and Hui 1982) [6]

Segundo Walter, o coeficiente de pressão existente numa determinada superfície do edifício é definido pelo quociente entre a diferença de pressão existente na mesma com uma pressão de referência (pressão atmosférica) e a pressão exercida pela velocidade do vento adoptada.

$$C_p = \frac{P_{sup} - P_{ref}}{P_{vent}} \quad (2.8)$$

De outra forma, Allen (1984) apresenta a relação entre o coeficiente de pressão e as características dimensionáveis do edifício apresentando estas como uma função com diversos factores.

$$C_p = \frac{P - P_{(0)}}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2} = f(L, H, WD, Re, St) \quad (2.9)$$

Onde  $P$  é a pressão no ponto onde o coeficiente deve ser calculado  $P_{(0)}$  é a pressão de referência,  $\rho$  é a densidade do ar,  $v$  é a velocidade de referência do ar e  $f$  é uma função que depende das dimensões vertical e horizontal ( $L$  e  $H$ ), direcção do vento ( $WD$ ), do número de Reynolds e de Strouhal coeficientes de escoamento do ar e de descrição de mecanismos de fluxo respectivamente.

Como a maioria dos edifícios situa-se em zonas urbanas, o fluxo de ar que incide num edifício sofre alterações na sua direcção e intensidade com os inúmeros obstáculos existentes (edifícios vizinhos, árvores, etc.), tornando assim difícil a obtenção de resultados reais. Desta forma, para o cálculo de taxas de ventilação em edifícios arquitectonicamente simples, é bastante aceitável a utilização de aproximações de valores resultantes do túnel de vento. Deste modo, existem várias formas de obter estes valores, como alguns exemplos temos Allen (1984) e Lindament (1986), que apresentam valores tabelados, Swami e Chandra (1979), Akins (1979) e Sharag-Eldin (2007) que desenvolveram equações de regressão linear para obtenção de valores de  $C_{pe}$  médios e Grosso (1992) e Knoll (1996) com aplicações computacionais através do programa *TNO CP Generator* para determinação dos coeficientes.

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

Figura 2.9: Valores recomendados dos coeficientes de pressão exterior para paredes verticais dos edifícios de planta regular [22]

Swami e Chandra relacionaram o efeito da direcção do fluxo de ar para vários casos com o coeficiente de pressão de uma superfície desobstruída e estabeleceram uma relação matemática entre o coeficiente de pressão, a geometria de um bloco, e a direcção do vento. A regressão não-linear efectuada para a obtenção da equação apresenta um coeficiente de correlação de 0,8 o que é bastante aceitável considerando a grandeza da amostra. Um coeficiente de pressão num determinado ponto de uma fachada varia conforme o posicionamento do ponto na superfície, principalmente nas zonas próximas das arestas. A equação de Swami e Chandra faz uma simplificação através do coeficiente médio da superfície, o que pode levar a um erro na ordem dos 10%.

$$C_p = 0,6 \cdot \ln \left[ \left( 1,248 - 0,703 \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right) - 1,175 \sin^2(\alpha) + 0,131 \sin^3(2\alpha G) + 0,769 \cos\left(\frac{\alpha}{2}\right) + 0,07G^2 \sin^2\left(\frac{\alpha}{2}\right) + 0,717 \cos^2\left(\frac{\alpha}{2}\right) \right) \right] \quad (2.10)$$

Onde  $\alpha$  é o ângulo de incidência do vento com a normal da fachada,  $G$  é o logaritmo natural da relação da largura da parede com a sua parede adjacente.

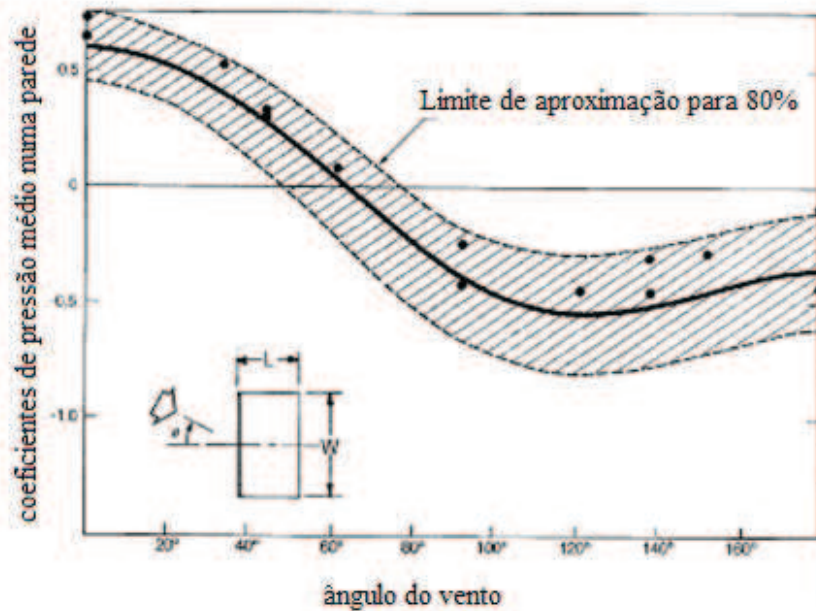


Figura 2.10: Variação dos coeficientes de pressão médios numa parede para cada ângulo de incidência segundo Swami and Chandra[6]

A equação 2.10 é utilizada no programa *EnergyPlus* para o cálculo de coeficientes de pressão em edifícios de cota baixa (onde a altura do edifício não excede em três vezes o comprimento das fachadas) e de superfícies regulares. Para edifícios de cota mais elevada, este *software* utiliza a equação de Akins (1979).

### 2.3.6 Coeficiente de descarga

O fluxo de ar que é admitido no edifício começa a perder intensidade no instante que incide contra um elemento (arquitectónico, estrutural ou decorativo) que se encontre no seu caminho. Estas perdas podem ser causadas por mudança de direcção, fricção, aumento ou diminuição da secção e resistências dos fluxos existentes nas passagens de ar.

A resistência causada pelos fluxos e alteração das dimensões da secção de escoamento denomina-se coeficiente de descarga. Segundo ALLARD, o coeficiente de descarga,  $C_d$ , é uma função que varia consoante a velocidade do vento, a diferença de temperatura do ar e, principalmente, com a geometria da secção. Segundo Limb, no manual de infiltração e ventilação da AIVC,  $C_d$  é um coeficiente adimensional que relaciona a taxa de fluxo de ar média admitida nas aberturas com a diferença de pressão existente entre elas. O cálculo destes valores não é necessário na maioria dos casos, pois existem valores médios pré-estabelecidos como suficientes para o cálculo da ventilação natural. Ainda assim, para uma melhor aproximação podem consultar-se tabelas específicas ou realizar ensaios para a obtenção de valores mais rigorosos.

Tabela 2.2: Coeficientes de descarga para vários tipos de janela [24]

Tipo de janela	$C_d$
Veneziana com 50% de área livre	0,40
Basculante com 60 graus	0,58
Abertura com arestas vivas	0,62
Abertura com arestas truncadas	0,85

### 2.3.7 Infiltração

Como referido nos tópicos anteriores, as massas de ar também se movimentam através de aberturas não dimensionadas. Estas movimentações denominam-se por infiltrações. Alguns autores desprezam as infiltrações pois defendem que a ventilação é um processo intencional. Outras referências, como é o caso da norma 62-2001 da ASHRAE [6], consideram as infiltrações como parte da ventilação mas não da ventilação natural que pressupõem aberturas previamente dimensionadas para o efeito. Assim sendo, as infiltrações podem alterar os fluxos de ar primeiramente calculados e proporcionar alterações significativas nos consumos energéticos. As fendas, existentes nos edifícios, mais significativas no tema de ventilação são as fendas nos caixilhos das janelas e nas portas da envolvente exterior, os espaços entre as caixas de estore, o material onde estas são colocadas e as fendas nas portas divisórias interiores. A equação utilizada para obter a taxa de fluxo de ar provocada por infiltrações através de pequenas aberturas não dimensionadas, fendas, é representada por uma equação exponencial do tipo:

$$Q = k \cdot (\Delta P^n) \quad (2.11)$$

Onde  $Q$  é o caudal,  $k$  o coeficiente de fluxo relativo ao tamanho da abertura ( $m^3 s^{-1}$  a 1Pa),  $\Delta P$  a variação de pressão na frecha e  $n$  o expoente de fluxo.

Esta equação é afectada por um coeficiente, por forma a ser tida em consideração a correcção do tamanho da abertura. O expoente de fluxo,  $n$ , depende das características do fluxo de ar e pode variar entre 0,5 e 1,0, sendo que, 0,5 significa um regime turbulento e 1,0 um regime laminar. Para esta variável é recomendado [24] um valor médio de 0,67 para frestas que se situam em torno de uma janela fechada.

### 2.3.8 Ventilação transversal

A ventilação transversal denominada por vezes de ventilação cruzada, é um tipo de ventilação muito utilizada como ventilação natural. Com a existência de aberturas ao mesmo nível em lados “opostos” do edifício o ar atravessa o interior do edifício através das portas e corredores interiores, desta forma além de garantir a ventilação das zonas também executa um varrimento dos poluentes existentes no ar e excesso de carga térmica.

Uma pressão positiva do lado do vento e/ou uma pressão negativa do lado oposto do edifício provoca um movimento de ar através da zona, no sentido de onde sopra o vento (barlavento) para o lado oposto (sotavento), desde que as aberturas de ambos os lados estejam abertas. Este modo de ventilação pode ou não ter em conta os diferenciais de temperatura que causam o efeito “chaminé”.

Para garantir um fluxo de ar confortável aos utilizadores dos espaços ventilados transversalmente, pode deixar-se as aberturas de admissão com uma secção de passagem de fluxo inferior às aberturas de extracção.

### 2.3.9 Ventilação unilateral

A ventilação unilateral, é característica de edifícios que apresentam aberturas numa única fachada. Assim a renovação do ar interior é efectuada apenas por uma fachada estando sujeito apenas às condições climáticas da zona exposta ao exterior. Embora não sendo comum um edifício pode utilizar ventilação unilateral tendo mais que uma fachada em contacto com o exterior. Para tal, é necessário tratar cada zona do edifício/apartamento como um só, isolando as zonas para reduzir ao máximo os caudais existentes entre compartimentos interiores, fazendo com que o ar seja admitido apenas quando existe pressões positivas nas fachadas e extraído quando existe pressões negativas.

## 2.4 Métodos utilizados na determinação de taxas de renovação de ar

A taxa de renovação pode ser obtida através de métodos empíricos ou teóricos. Os métodos empíricos dependem de dados resultantes de medições de caudais *in situ* e os métodos teóricos são constituídos por modelos matemáticos e métodos simplificados.

Existem três tipos de modelos para a determinação dos caudais que são adoptados para simulações computacionais: modelos nodais, modelos de zona e modelos de dinâmica de fluídos. A partir de todos estes modelos, é possível obter resultados de quantidades de ar admitidas nas habitações e sabendo o volume da zona, determinar uma taxa de renovação de ar para um determinado espaço de tempo. Quase sempre a taxa de renovação aparece com valores horários.

A renovação horária pode ser interpretada como o número de vezes que uma determinada zona renova o ar existente no seu interior por cada hora. No entanto, obter uma renovação horária de  $1h^{-1}$  significa que o caudal que é admitido na zona em estudo durante uma hora é igual ao ar já existente na zona e não que o ar é todo renovado.

$$R_{ph} = \frac{Q}{V} \quad (2.12)$$

A renovação horária não é um valor constante ao longo do tempo, estando dependente das condições atmosféricas e do modo que as aberturas existentes no edifício são operadas. Quando, durante um determinado período existe um diferencial de temperatura maior entre o exterior e o interior, ou uma janela/porta é aberta, o caudal aumenta significativamente aumentando assim, a taxa de renovação horária. Deste modo pode concluir-se que o valor de  $R_{ph}$  é válido apenas para o período em que é calculado.

## 2.5 Legislação portuguesa para ventilação natural e certificação energética

A legislação portuguesa com referências específicas à ventilação natural resume-se a dois documentos, o Regulamento das Características de Comportamento Térmico de Edifícios, RCCTE,[9], aprovado pelo Decreto-Lei n.º80/2006 e que transpõe parcialmente a Directiva Europeia n.º2002/91/CE. O RCCTE estabelece uma taxa de renovação horária de  $0,6h^{-1}$  para novos edifícios de habitação e pequenos edifícios de serviços como garantia da salubridade do ar interior. E a norma portuguesa NP 1037-1 de 2002, que define as regras a que devem obedecer os sistemas de ventilação natural em edifícios de

habitação. Esta norma parte de um caudal tipo como elemento de dimensionamento e não como um caudal a assegurar.

Anteriormente à existência destes documentos a concepção de sistemas de ventilação natural dos edifícios em Portugal era baseada num conjunto de recomendações existentes numa publicação do LNEC, “Ventilação Natural de Edifícios de Habitação”.

A nível energético está em vigor, constituído pelo DL 78/2006, o Sistema de Certificação Energética e Qualidade do Ar Interior de Edifícios - SCE. Este documento responsável pela avaliação energética dos edifícios, resultante da transposição da directiva 2002/91/CE da Comunidade Europeia permite aos proprietários terem uma noção da qualidade do seu imóvel, a nível energético, identificar pontos de melhoria de desempenho energético e reduzir as emissões de  $CO_2$  para a atmosfera. O resultado da avaliação é representado por uma letra pertencente a uma escala de A+ a G e tem como base uma habitação de referencia(B-). A título de exemplo um edifício que apresente classe A+ tem um desempenho energético 25% superior ao de referencia.

### 2.5.1 Conforto térmico

De um modo geral pode definir-se conforto térmico como “o estado de espírito que expressa satisfação com o ambiente térmico”[6]. Assim uma pessoa está termicamente confortável quando não sente frio nem calor.

O corpo humano está ininterruptamente a produzir calor assim como está constantemente a ganhar ou a perder energia devido ao contacto com um ambiente. Desta forma é fácil definir que o conforto térmico resulta das condições e trocas de calor entre o ser humano e o ambiente. Para que o ser humano esteja termicamente confortável é necessário manter a temperatura externa do seu corpo aproximadamente a 37° C. No entanto é de salientar que equilíbrio térmico e conforto térmico são conceitos bastante distintos, pois pode ocorrer equilíbrio térmico para temperatura bastante desconfortáveis. Portanto pode dizer-se de um ponto de vista puramente fisiológico que o conforto térmico é atingido quando os mecanismos termoreguladores do corpo humano encontram-se em actividade reduzida.

#### Conforto térmico segundo RCCTE

Segundo o RCCTE, o conforto térmico é abordado de uma forma mais simples. Este documento estabelece temperaturas interiores para as estações de aquecimento(Inverno) e arrefecimento(Verão) adoptando 20° C e 25° C respectivamente para cada estação.

#### Necessidades de aquecimento e arrefecimento

As necessidades de aquecimento e arrefecimento são, as quantidades de energia necessária para manter o edifício a uma determinada temperatura. O Regulamento das Características de Comportamento Térmico de Edifícios prevê, que para um edifício ser confortável a temperatura tem de estar compreendida no intervalo de 20 ° C a 25 ° C. Deste modo, a quantidade de energia necessária para manter a temperatura do edifício acima dos 20 ° C, nos dias mais frescos, denomina-se por necessidade de aquecimento e a energia necessária para manter o edifício abaixo dos 25 ° C, nos dias mais quentes, por necessidade de arrefecimento.





## Capítulo 3

# Modelos de cálculo

### 3.1 Modelos de cálculo

No estudo da ventilação natural, interessa calcular a quantidade de ar admitida em cada zona de modo a poder obter as variáveis dependentes da entrada do fluxo de ar na habitação. A modelação de um sistema de ventilação é dificultada pela grande variabilidade do vento. Para calcular esta quantidade de ar existem diversos métodos de cálculo, métodos analíticos simplificados e métodos computacionais interactivos. Estes modelos podem ser divididos pelas características da modelação do sistema, existindo assim modelos nodais, de zona, e de dinâmica de fluidos computacional(CFD) que compõem dois grupos de modelos, os modelos empíricos e os modelos computacionais.

Os modelos empíricos simplificados são mais utilizados para uma primeira abordagem do problema obtendo resultados a partir de equações analíticas simples, das áreas de entrada e saída de ar e tem em conta as condições da envolvente. Estes modelos apresentam certas limitações tais como não terem em conta as interações entre zonas e assim, com esta restrição, só se poder calcular os fluxos de ar para uma zona de cada vez.

Os modelos computacionais são baseados em modelos nodais onde a habitação é representada por nós, interiores e exteriores, e ligações entre estes que permitem a representação do fluxo de ar que atravessa as aberturas entre as diversas zonas. Estes modelos são geralmente mais complexos e partem de valores atribuídos a variáveis que através de numerosas iterações convergem para uma solução.

#### 3.1.1 Modelos empíricos

##### Modelo de Aynsley

Este modelo tem como principal característica a consideração do vento apenas na sua acção para ventilação cruzada não considerando o efeito da temperatura do ar interior e exterior. Neste modelo o fluxo de ar é obtido através da equação 3.1

$$\phi = \left[ \frac{(C_{p1} - C_{n+1}) \cdot v_z^2}{\frac{1}{Cd_1^2 + A_1}} + \dots + \left( \frac{1}{Cd_n^2 + An^2} \right) \right]^{0,5} \quad (3.1)$$

onde:  $C_{p_1}$  é o coeficiente de pressão na abertura de entrada,  $C_{p_{n+1}}$  é o coeficiente de pressão na abertura de saída,  $Cd_1$  é o coeficiente de descarga na entrada,  $A_1$  é a área de entrada, em  $m^2$ ,  $Cd_n$  é o coeficiente de descarga na saída,  $A_n$  é a área de saída de ar, em  $m^2$  e  $v_z$  é a velocidade de referência do vento ao nível da cobertura, em  $ms^{-1}$ .

### Modelo Irminger

Este modelo é baseado na ventilação por acção do vento. As fachadas de barlavento estão sujeitas a pressões positivas, enquanto as fachadas de sotavento estão sujeitas a pressões negativas. Essa diferença de pressão entre as fachadas provoca uma movimentação de massas de ar. A taxa de ventilação é calculada tendo em consideração a diferença de pressão, a velocidade do vento e o seu ângulo de incidência. É recomendado para a aplicação em casos de janelas de correr, de abrir, ou aberturas sem obstrução, sendo apresentado por Frota e Schiffer (2003). Nesse modelo, o fluxo, em  $m^3s^{-1}$ , é definido por:

$$\phi = C_a \cdot A_0 \cdot v \cdot (C_e - C_s)^{1/2} \quad (3.2)$$

onde  $C_a$  é o coeficiente descarga,  $A_0$  é a área equivalente das aberturas, ou seja, uma combinação entre a área de entrada e a de saída do fluxo de ar, em  $m^2$ ,  $v$  é a velocidade do vento externo resultante na abertura, em  $ms^{-1}$ ,  $C_e$  é o coeficiente de pressão na abertura de entrada de ar,  $C_s$  é o coeficiente de pressão na abertura de saída de ar.

### Modelo Van Straaten

O modelo de Van Straaten propõe o dimensionamento da área das aberturas a partir da quantidade de calor a ser retirado do ambiente pela ventilação, conforme as características de ocupação e de construção do local. Este método é recomendado para aplicação em casos de janelas pivotantes horizontais. Utiliza três coeficientes:  $C_1$  considera o efeito combinado de aberturas em série e da inclinação da bandeira pivotante em relação ao plano horizontal,  $C_2$  representa o grau de obstrução dos edifícios vizinhos e  $C_3$  a orientação da normal à fachada em relação à direcção de vento além da velocidade média do vento no exterior. No modelo apresentado, o fluxo de ar, em  $m^3s^{-1}$ , é calculador por:

$$\phi = C_1 \cdot C_2 \cdot A \cdot v \cdot \sqrt{C_3} \quad (3.3)$$

onde  $A$  é a área necessária para o fluxo de ar e também uma área combinada de entrada e saída do ar calculada com base na razão entre estas, em  $m^2$ ,  $v$  é a velocidade do vento no exterior, em  $ms^{-1}$ .

### Método do comprimento de fresta

Este método devolve estimativas do número de renovações horárias de ar em edifícios, contabilizando a determinação da sua carga térmica de projecto embora também possa ser utilizado para situações de carga parcial. O valor calculado para as infiltrações tem como base as condições climáticas extremas médias (valores sobreestimados). Os resultados são obtidos através das equações 3.4, 3.5 e 3.6.

$$p = p_{ref} + \frac{1}{2} \rho \cdot v_{ref}^2 \cdot C_p \quad (3.4)$$

$$\dot{V} = K(\Delta p)^\beta \quad (3.5)$$

$$\sum \rho_e \dot{v}_e = \sum \rho_s \dot{v}_s \quad (3.6)$$

Onde  $p$  é a pressão num ponto,  $p_{ref}$  a pressão de referência,  $\rho$  a densidade do ar,  $v_{ref}$  a velocidade de referência,  $C_p$  o coeficiente de pressão,  $\dot{V}$  o caudal volúmico do ar,  $K$  o coeficiente de escoamento,  $\Delta p$  a variação de pressão e  $\beta$  o expoente de escoamento.

Este método pode partir das seguintes simplificações:

- Considerar o edifício em estudo como uma zona única sendo assim possível calcular os caudais através da sua envolvente;
- Ignorar as trocas de ar entre elementos opacos calculando unicamente os fluxos de ar que atravessam as frinchas e as juntas;
- Não ter em conta a direcção do vento nem a zona onde o edifício esta implementado.

Este método não permite fazer simulações das infiltrações de um edifício mas possibilita, fazer estimativas relativamente rápidas do número de renovações horárias.

#### **Modelo ASHRAE [6]**

Este modelo necessita do conhecimento da área efectiva das frestas do edifício em estudo, que podem ser determinadas utilizando valores tabelados ou através de experimentação utilizando técnicas de pressurização/despressurização. Neste método o caudal de ventilação é obtido através da equação 3.7.

$$\phi = A \cdot \sqrt{\alpha \Delta T + b \cdot U_{met}^2} \quad (3.7)$$

Onde  $A$  é a área efectiva das frechas do edifício,  $\alpha$  o coeficiente associado ao gradiente de temperatura,  $b$  o coeficiente associado ao efeito do vento,  $\Delta T$  a diferença de temperatura média entre o interior e o exterior e  $U_{met}$  a velocidade do vento medida na estação meteorológica.

#### **Modelo British Standards [14]**

Este método propõe um conjunto de equações para o cálculo da infiltração e ventilação natural em edifícios com ventilação unilateral, ou seja, através de apenas uma fachada, e ventilação cruzada, isto é, várias aberturas em fachadas opostas. Assume o fluxo de ar bidireccional e ignora todas as partições existentes no interior do edifício assumindo que o este é apenas uma única zona de análise. Nos tópicos seguintes apresentam-se as expressões propostas por este método, para situações de ventilação unilateral e cruzada.

- Ventilação unilateral provocada pela acção do vento

$$Q = 0,025 \cdot A \cdot U_v \quad (3.8)$$



Figura 3.1

- Ventilação unilateral provocada pela diferença de temperaturas

$$Q = C_d \cdot \frac{A}{3} \cdot \sqrt{\frac{\Delta T \cdot g \cdot H_2}{T}} \quad (3.9)$$

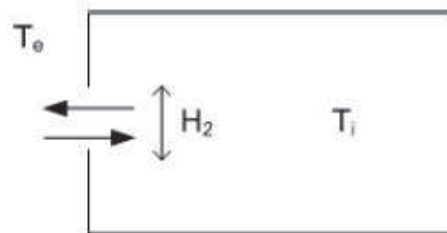


Figura 3.2

- Ventilação unilateral provocada pela diferença de temperaturas

$$Q = C_d \cdot A \cdot \left[ \frac{\sqrt{2} \cdot \epsilon}{(1 + \epsilon)(1 + \epsilon)^{1/2}} \right] \left[ \sqrt{\frac{\Delta T \cdot g \cdot H_1}{T}} \right] \quad (3.10)$$

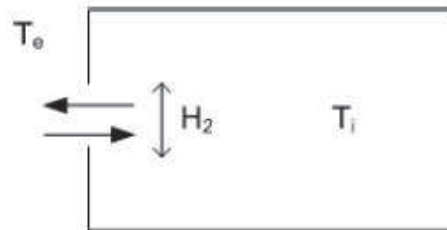


Figura 3.3

- Ventilação transversal provocada pela acção do vento

$$Q_w = C_d \cdot A_w \cdot U_v \cdot \sqrt{\Delta C_p}, \quad (3.11a)$$

$$\frac{1}{A_w^2} = \frac{1}{(A_1 + A_2)^2} + \frac{1}{(A_3 + A_4)^2}. \quad (3.11b)$$

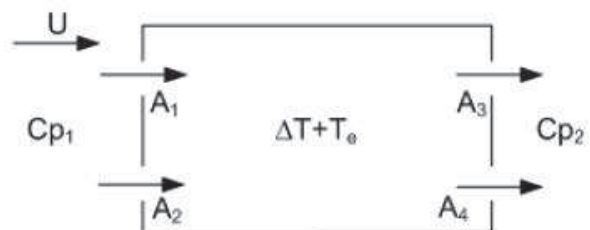


Figura 3.4

- Ventilação transversal provocada pela diferença de temperatura

$$Q_b = C_d \cdot A_b \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta T \cdot H_1}{T}}, \quad (3.12a)$$

$$\frac{1}{A_b^2} = \frac{1}{(A_1 + A_3)^2} + \frac{1}{(A_2 + A_4)^2}. \quad (3.12b)$$

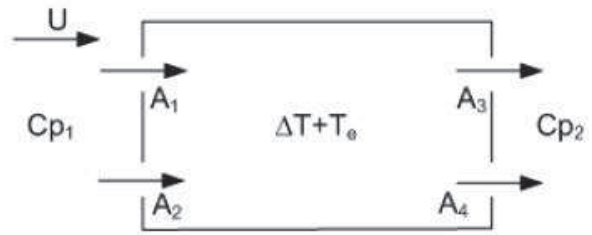


Figura 3.5

- Ventilação transversal provocada pela diferença de temperatura e pela acção do vento

$$Q = Q_b \text{ se } \frac{U_v}{\sqrt{\Delta T}} < 0,26 \cdot \frac{A_b \cdot H_1}{A_w \cdot \Delta C_p}, \quad (3.13a)$$

$$Q = Q_w \text{ se } \frac{U_v}{\sqrt{\Delta T}} > 0,26 \cdot \frac{A_b \cdot H_1}{A_w \cdot \Delta C_p}. \quad (3.13b)$$

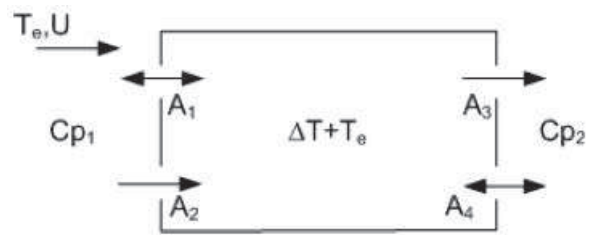


Figura 3.6

Onde  $A$  é a área da abertura,  $U_v$  a velocidade do vento,  $C_d$  o coeficiente de descarga,  $\Delta T$  a diferença de temperatura entre o interior e o exterior,  $T$  a temperatura média,  $\epsilon$  a relação entre as áreas das aberturas e  $H_1$  a diferença de cotas entre aberturas.

**Modelo LNEC [13]**

O LNEC, através do primeiro trabalho produzido em Portugal sobre este tema, obteve expressões simples deduzidas com base em algumas aproximações.

Assim, o caudal de entrada ou de saída devido ao efeito de chaminé para duas aberturas iguais a alturas diferentes é obtido pela expressão 3.14.

$$q = 0,16 \cdot A \sqrt{\frac{h}{2} \Delta T_{int-ext}} \quad (3.14)$$

Onde  $q$  é o caudal volúmico em  $m^3/s$ ,  $A$  é a área de uma abertura em  $m^2$ ,  $h$  a distância na vertical entre as duas superfícies medida entre pontos médios em  $m$  e  $\Delta T_{int-ext}$  é a diferença de temperatura medida entre o ambiente exterior e interior em  $^{\circ}C$ .

Para o cálculo do caudal devido ao efeito de chaminé para dois conjuntos de aberturas a altura diferente utiliza-se a equação 3.15.

$$q = 0,16 \sqrt{\frac{h \Delta T_{int-ext}}{\frac{1}{A_e^2} + \frac{1}{A_s^2}}} \quad (3.15)$$

Onde  $A_e$  e  $A_s$  são respectivamente a área efectiva total das aberturas de entrada e saída.

Para o caso das aberturas estarem dispostas em série o cálculo do caudal devido ao efeito do vento é calculado a partir da equação 3.16.

$$q = 0,6 \cdot A_{eq} \cdot U \sqrt{C_{pe} - C_{ps}} \quad (3.16)$$

### 3.1.2 Modelos nodais

Num modelo nodal como o nome indica cada zona é representada por um nó, o ambiente exterior é representado da mesma forma estando cada fachada associada a um nó. As interações entre as zonas são representadas por aberturas que comunicam entre si, permitindo a passagem do fluxo de ar. O contacto com o ambiente exterior é representado de forma semelhante. Para os nós exteriores são atribuídos valores de pressão. Na figura 3.7 observa-se um exemplo de uma rede de fluxo de ar.

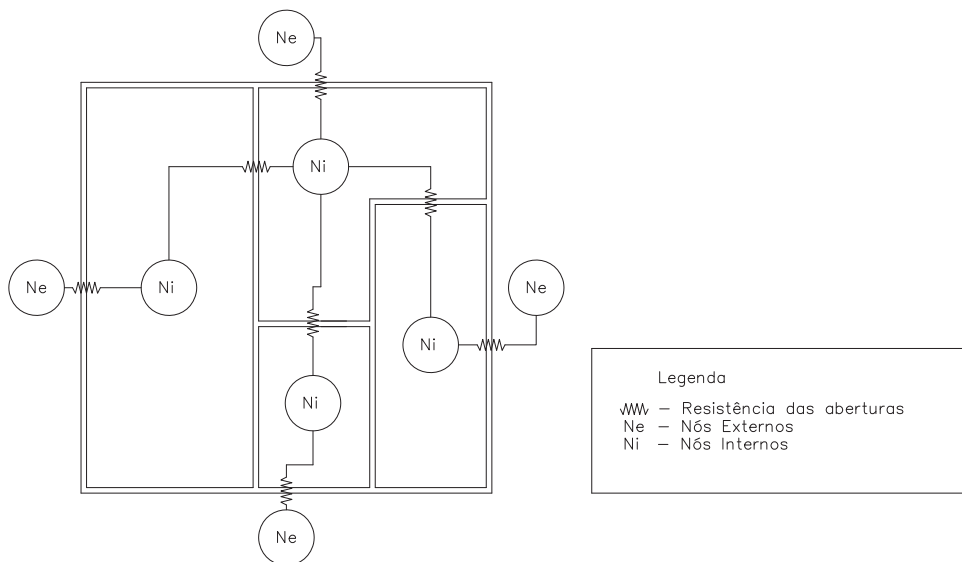


Figura 3.7: Modelo Nodal

Inicialmente só se conhece as pressões exercidas pelo vento nas fachadas, representadas pelos nós exteriores, mas ao ligar-se todos os nós é torna-se possível o cálculo da pressão dos nós internos utilizando equações de equilíbrio de massa em cada nó e assim, sabendo a pressão de cada abertura calcular o fluxo de ar. O balanço de massa da zona  $i$  com a abertura  $j$  é dado pela equação 3.17

$$\sum_{k=1}^i \rho_i \cdot Q_{ik} = 0 \quad (3.17)$$

Onde  $\rho_i$  é a densidade do ar do fluxo ( $kg/s$ ) e  $Q_{ik}$  é o fluxo volumétrico da zona  $i$  para a zona  $k(m^3/s)$ .

Ao aplicar esta equação a cada nó interno resulta um sistema de equações não-lineares simultâneas onde a solução é a pressão do nó interior. A solução deste problema é baseada no método de Newton-Raphson

que consiste na atribuição de uma pressão inicial para os nós e a cada iteração obter um novo valor de pressão minimizando o valor residual deixado por este sistema.

Considerando os nós 1 e 2 onde nó 1 é um nó interno e o nó 2 um nó externo, o fluxo  $Q_{12}$  a uma função da diferença de pressão entre os dois nós através da abertura,  $\Delta P_{12}$ , podendo ser positiva ou negativa conforme o sinal de  $\Delta P_{12}$ .

$$\Delta P_{12} = P_1 - P_2 \quad (3.18)$$

Se  $\Delta P_{12} > 0$  então  $Q_{12} > 0$  e o fluxo de ar dá-se de 1 para 2. E se  $\Delta P_{12} < 0$  então  $Q_{12} < 0$  e o fluxo dá-se de 2 para 1

Existem vários *softwares* que ao longo do anos têm vindo a usar modelos de rede, sendo os mais utilizados, testados e validados referidos nos subtópicos seguintes.

#### **Modelo COMIS**

O software COMIS (EUA, 2004) foi desenvolvido para detalhar a infiltração de ar através de zonas levando em consideração o fluxo por frestas e mecanismos de transporte através de grandes aberturas, usando no cálculo deste as temperaturas interna, externa e a pressão do vento.

#### **Modelos AIOLOS**

O software AIOLOS foi criado pela Universidade de Atenas, Grécia, tendo sido desenvolvido para o cálculo do fluxo de ar da ventilação natural por acção dos ventos. Tratando-se de um modelo multi-zona, é focado no cálculo do fluxo de ar nas diversas zonas de um edifício. Neste modelo, o fluxo é calculado com base nas equações de conservação de massa e energia (ALLARD, 1998). Este modelo não pede a introdução da tipologia da abertura, apenas da sua área.

#### **Modelo AIRNET**

O software AIRNET desenvolvido pelo NIST (*National Institute of Standards and Technology*) pertencente ao departamento do comércio americano tem como base de cálculo equações de conservação de massa. Este modelo é obtido através de perguntas efectuadas ao utilizador de modo a definir os parâmetros necessários para o cálculo do modelo de ventilação assim como os limites que as variáveis podem tomar [26]. As perguntas efectuadas pelo software são do tipo sim/não e de introdução de parâmetros.

#### **Modelo CONTAM**

Este software veio substituir o seu predecessor AIRNET otimizando o cálculo das redes. Na sua última versão possui a opção de modelar sistemas com base em CFD (Computer fluid dynamics). Este software é desenvolvido pelo NITS (National Institute of Standards and Technology) [12].

### 3.1.3 Modelos CFD

Este tipo de modelação permite determinar a distribuição da velocidade e pressão do vento interna e externa de um edifício, assim como as taxas de renovação de ar. Esta modelação necessita de uma grande capacidade de cálculo mas com a evolução tecnológica da última década este modo de cálculo tem vindo a ganhar uma maior visão por parte de investigadores e técnicos especializados para o estudo de sistemas de ventilação natural.

A mecânica dos fluidos computacional é um modelo baseado na discretização de um edifício em pequenos subvolumes, aos quais se aplicam a expressão de conservação da massa, energia e quantidade de movimento, com o objectivo de obter os campos de velocidade e temperatura e pressões. As seguintes equações são aplicadas a cada volume finito e partindo de condições de fronteira específicas para cada caso em análise calcula-se as pressões e as velocidades. Estas expressões dão origem a um sistema de equações que normalmente é resolvido recorrendo a métodos numéricos do tipo *SIMPLE* ou *TDMA* [32].

$$\frac{\delta \rho}{\delta t} + \nabla \cdot (\rho V) = 0, \quad (3.19a)$$

$$\frac{\delta(\rho u)}{\delta t} + \nabla \cdot (\rho u V) = -\frac{\delta \rho}{\delta x} + \rho f_x, \quad (3.19b)$$

$$\frac{\delta(\rho v)}{\delta t} + \nabla \cdot (\rho v V) = -\frac{\delta \rho}{\delta y} + \rho f_y, \quad (3.19c)$$

$$\frac{\delta(\rho w)}{\delta t} + \nabla \cdot (\rho w V) = -\frac{\delta \rho}{\delta z} + \rho f_z, \quad (3.19d)$$

$$\begin{aligned} \frac{\delta}{\delta t} \left[ \rho \left( e + \frac{V^2}{2} \right) \right] + \nabla \cdot \left[ \rho \left( e + \frac{V^2}{2} \right) V \right] &= \\ = \rho q - \frac{\delta(\rho u)}{\delta x} - \frac{\delta(\rho v)}{\delta y} - \frac{\delta(\rho w)}{\delta z} + \rho f \cdot V \end{aligned} \quad (3.19e)$$

Onde a equação 3.19a é referente à conservação da massa, as equações 3.19b, 3.19c e 3.19d são referentes à quantidade de movimento nas direcções x, y e z respectivamente e a equação 3.19e é a equação de energia.

Existem estudos comparativos entre os modelos CFD e métodos experimentais e pode-se concluir que os modelos CFD apresentam uma boa aproximação aos valores reais. Evola e Popov [15] analisaram dois modelos de CFD aplicados a ambientes cúbicos com diferentes configurações de ventilação. Comparando-se os resultados obtidos pelos modelos CFD e os obtidos experimentalmente conclui-se que existe uma boa correlação. Outros investigadores como Good [10], que considera os modelos CFD indispensáveis para o fluxo de ar interno e Stavrakakis, [27] que efectuou o estudo de ventilação cruzada com aberturas em posições não simétricas também concluí-se que os modelos CFD aproximam-se bastante dos valores medidos experimentalmente.



### 3.1.4 Técnicas de medição

Os métodos experimentais servem fundamentalmente para o cálculo de cargas térmicas em edifícios. Estes métodos medem directamente as características dos edifícios avaliando os seus sistemas de ventilação natural nomeadamente as áreas das frestas e caudais de ar e têm a particularidade de permitirem obter valores para a implementação de sistemas de ventilação e de permitir avaliar sistemas existentes

#### Método de pressurização

Este método tem como principal objectivo determinar as áreas das frinchas e caudais de ventilação entre outros indicadores, de modo a permitir comparações com outros edifícios em termos de trocas de ar com o exterior.

O método da pressurização consiste na substituição de uma porta ou janela por um equipamento denominado “porta ventiladora”, que é uma porta de dimensões variáveis permitindo a adaptação a diversos vãos equipada com um ventilador. Quando em funcionamento este equipamento cria um diferencial de pressões entre o interior e o exterior do edifício consoante este esteja numa fase de admissão ou extracção de ar. Assim é possível para uma determinada variação de pressões obter o valor de caudal movimentado.

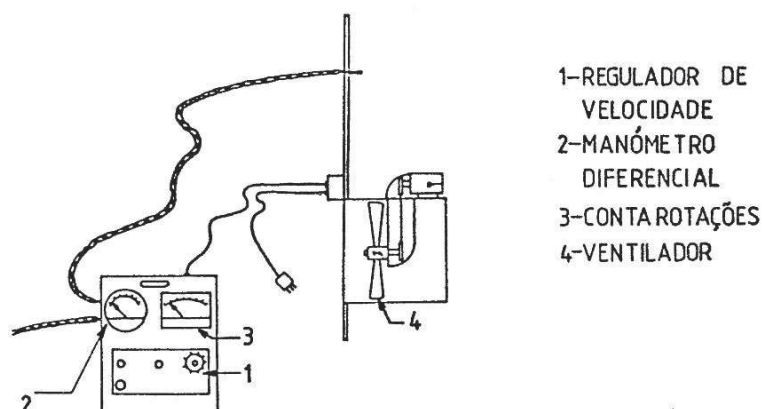


Figura 3.8: Esquema da porta ventiladora[8]

#### Anemometria

As características deste método estão focadas na medição de caudais de ar trocados entre zonas. A metodologia deste processo passa pela integração do perfil de velocidades estacionário tipicamente estabelecido entre dois compartimentos a temperaturas diferentes.

Balcom e Yamagushi utilizando a anemometria e a equação de Bernoulli, 2.1 desenvolveram uma equação simplificada para o cálculo do fluxo de ar existente entre duas zonas.

$$Q = 2,21 \cdot l \sqrt{a^3 \cdot \Delta T} \quad (3.20)$$

Desta forma ao saber-se as dimensões da porta e as temperaturas de ambas as zonas pode-se calcular os caudais de ar que se cruzam nos dois sentidos. Os inconvenientes deste método é a utilização do anemómetro que altera que provoca modificações no escoamento de ar e proceder a uma correcta medição dos caudais nas frinchas devido à dimensão da ponta de prova do anemómetro que pode ultrapassar a largura das frinchas.

### Método dos gases traçadores

Este método permite obter todos os caudais de um edifício, sendo assim uma mais valia não só em termos de obtenção de bons resultados como também na verificação dos modelos anteriormente descritos. Além do cálculo dos fluxos de ar existentes no edifício este método permite também determinar a eficiência da ventilação e de remoção de poluentes. A desvantagem deste método está associada ao preço dos equipamentos e custos de funcionamento que são elevados.

O ensaio consiste na introdução de um gás conhecido na zona a testar (gás traçador) medindo e analisando a sua evolução ao longo do tempo com auxílio de um analisador e segui-lo no decorrer da experiência. Admitindo-se ainda que as temperaturas do ar interior e exterior mantém as suas densidades, ou seja, as temperaturas são constantes ao longo do tempo de medição e que o vento é estacionário o balanço mássico pode ser escrito em termos de caudais volúmicos pela equação 3.21

$$V \frac{\delta c(t)}{\delta t} + Q \cdot c(t) = q \quad (3.21)$$

O gás utilizado tem de reunir várias características nomeadamente:

- ser detectável a baixas concentrações;
- ser não inflamável;
- ter massa volumica aproximadamente igual à do ar;
- ser não condensável;
- não ser produzido nem absorvido no espaço a testar;
- não ser dispendioso;
- não ser tóxico;
- não ser alérgico.

### 3.1.5 Modelos combinados

Este tipo de modelo surge com a necessidade de juntar as características positivas dos modelos de rede e CFD. Com os modelos de rede não é possível obter a distribuição dos fluxos de ar no ambiente e os modelos CFD são elaborados para uma condição estática, porém com os modelos CFD é possível descrever os fluxos de ar dentro e fora das zonas e com os modelos de rede facilmente se executa simulações dinâmicas obtendo assim taxas de fluxos de ar para todas as horas do ano.

Recentemente foram elaborados trabalhos onde os modelos de rede e CFD coexistem, Tan e Glicksman [31] acoplaram os programas *PHOENICS* e *Multivent*, Wang e Chen [30] combinaram os programas *CONTAM* e *CFD0* e entre outros Zhai [21] apresenta algumas formas de integrar o *Energyplus* com o *MIT-CFD*.

### 3.1.6 Modelo nodal do *EnergyPlus*

O *Energyplus*, é um programa de simulação energética em edifícios desenvolvido com a supervisão do departamento de energia dos Estados Unidos da América, utilizado para o estudo de inúmeros sistemas. Este programa modela, entre outros, sistemas de aquecimento/arrefecimento, iluminação, ventilação, de abastecimento de água. Este programa permite fazer simulações de todos os sistemas acima referidos para intervalos de tempo menores que uma hora, devolvendo variáveis referentes ao desempenho termo-energético, incluindo temperatura interior, taxas de ventilação de cada zona.

O modelo nodal, identificado no *software* por *Airflow Network*, do *EnergyPlus* permite a simulação de fluxos de ar causados pela acção do vento em diversas zonas através de um modelo nodal. Este modelo calcula a pressão em cada nó e o fluxo de ar que atravessa cada abertura, tendo em conta a pressão do vento, as características e relações de cada abertura de forma dinâmica em simulações horárias.

No fim da década de oitenta o *National Institute of Standards and Technology (NITS)* desenvolve o programa *AIRNET*, com o intuito de calcular o fluxo de ar através dos elementos de ventilação e de grandes aberturas verticais, considerando os dois sentidos de escoamento do fluxo. Uma década mais tarde, foi desenvolvido o *COMIS* pelo *Lawrence Berkeley National Laboratory (LBNL)*. Este *software* tem em consideração a influência da temperatura do ar nas interações entre os nós do modelo. Estes dois *softwares*, apesar de calcularem os fluxos de ar considerando a variável temperatura, não calculam a carga térmica devido à ventilação. Assim, com a necessidade de aprofundar o conhecimento sobre sistemas de ventilação, surge na década de noventa a acoplação de algoritmos que permitem em simultâneo ter em conta no estudo de um edifício de múltiplas zonas as variações de temperatura e carga térmica devido à ventilação. Desta forma, *softwares* como *AIRNET* e *COMIS* foram parcialmente integrados no *FSEC 3.0* e *DOE2*, respectivamente.

Com a necessidade crescente de contabilizar os requisitos energéticos de um edifício, o estudo da ventilação começa a ser efectuado utilizando o *software* *COMIS* para se obter os fluxos de ar causado pela acção do vento. Posteriormente é necessário integrar os valores obtidos nas respectivas zonas do edifício, especificadas no programa de cálculo energético *EnergyPlus*. Mais tarde, o algoritmo do *EnergyPlus* evolui, sendo introduzido um módulo que permite calcular perdas de carga térmica referentes à ventilação. Este módulo tem como base as equações do *AIRNET*. Para facilitar o estudo de sistemas de ventilação, foi desenvolvido o módulo *AirFlowNetwork* substituindo assim as ligações com outros *softwares* como o *COMIS* e o *ADS*.

### Processos do modelo *AirflowNetwork* do *EnergyPlus*

O objecto de introdução de dados, *AirflowNetwork:SimulationControl*, permite modelar o edifício num modelo nodal. Os objectos *AirflowNetwork:Distribution:Node*, *AirflowNetwork:Multizone:Zone* e *AirflowNetwork:Multizone:ExternalNode* representam os nós da rede enquanto os objectos *AirflowNetwork:Multizone:Surface* e *AirflowNetwork:Distribution:Linkage* representam a ligação entre os nós. Os restantes objectos são referentes às componentes do fluxo de ar.

Este modelo consiste em três passos sequenciais:

- Cálculo de pressão e fluxo de ar;
- Cálculo da temperatura e humidade em cada nó;
- Cálculo dos ganhos térmicos por condução e radiação.

O cálculo das pressões e dos fluxos de ar, determinam a pressão em cada nó e o fluxo de ar em cada passagem de ar, dando assim, as pressões do vento e os fluxos forçados. Baseado-se no cálculo do fluxo de ar para cada abertura, o modelo calcula em seguida a temperatura e a humidade dos nós, devolvendo assim, as temperaturas do ar e a percentagem de humidade de cada zona. Utilizando estas variáveis, os ganhos térmicos originados pelo fluxo de ar existente nas passagens de ar (previstas e não previstas), são somados a cada zona. Os ganhos energéticos, obtidos a cada iteração de cálculo são utilizados na equação de balanço energético para obter uma primeira abordagem do gastos energéticos de um sistema HVAC e para calcular a temperatura final e humidade de cada zona.

- Cálculo da temperatura numa zona

Num sistema de rede integrado com ventilação um dos objectivo é obter valores de temperatura e humidade para cada ponto. A formulação de problemas deste tipo resulta na equação 3.22 que simboliza o equilíbrio de calor de uma zona.

$$C_z \frac{\delta T_z}{\delta t} = \sum_{i=1}^{N_{sl}} \dot{Q}_i + \sum_{i=1}^{N_{surfaces}} h_i A_i (T_{si} - T_z) + \sum_{i=1}^{N_{zones}} \dot{m}_{inf} C_p (T_{zi} - T_z) + \dot{m}_{inf} C_p (T_{\infty} - T_z) + \dot{Q}_{sys} \quad (3.22)$$

Onde  $\sum_{i=1}^{N_{sl}} \dot{Q}_i$  é a soma dos ganhos por convecção,  $\sum_{i=1}^{N_{surfaces}} h_i A_i (T_{si} - T_z)$  é calor transferido por convecção pelas superfícies da zona,  $\dot{m}_{inf} C_p (T_{zi} - T_z)$  é calor transferido pela infiltração do ar exterior,  $\sum_{i=1}^{N_{zones}} \dot{m}_{inf}$  é transferência de calor resultante da mistura de ar entre zonas,  $\dot{Q}_{sys}$  é o ar extraído pelo sistema e  $C_z \frac{\delta T_z}{\delta t}$  é a energia existente no ar da zona.

Ao analisar este problema como um sistema estático a equação 3.22 pode ser apresentada da seguinte forma:

$$-\dot{Q}_{sys} = \sum_{i=1}^{N_{sl}} \dot{Q}_i + \sum_{i=1}^{N_{surfaces}} h_i A_i (T_{si} - T_z) + \sum_{i=1}^{N_{zones}} \dot{m}_{inf} C_p (T_{zi} - T_z) + \dot{m}_{inf} C_p (T_{\infty} - T_z) \quad (3.23)$$

O sistema de ventilação, permite que ar tanto quente como frio se misture com o ar existente na zona, que pode estar a uma temperatura superior ou inferior em relação ao ar admitido. A energia fornecida para a zona pode ser formulada a partir da diferença da entalpia do ar admitido e do ar extraído da zona como mostrado na equação 3.23.

$$\dot{Q}_{sys} = \dot{m}_{sys} C_p (T_{sup} - T_z) \quad (3.24)$$

Esta equação assume que a quantidade de ar que é extraída da zona é igual à quantidade de ar que é admitida. Substituindo a equação 3.24 na equação 3.22 obtém-se a seguinte equação:

$$C_z \frac{\delta T_z}{\delta t} = \sum_{i=1}^{N_{sl}} \dot{Q}_i + \sum_{i=1}^{N_{surfaces}} h_i A_i (T_{si} - T_z) + \sum_{i=1}^{N_{zones}} \dot{m}_{inf} C_p (T_{zi} - T_z) + \dot{m}_{inf} C_p (T_{\infty} - T_z) + \dot{m}_{sys} C_p (T_{sup} - T_z) \quad (3.25)$$

A soma das cargas energéticas resultantes da zona e da saída do sistema de ar fica assim igual à variação da energia armazenada na zona. Normalmente,  $C_z$  seria apenas a do ar da zona. No entanto, assume-se que as massas térmicas estão em equilíbrio com o ar da zona.

O *EnergyPlus* possui três algoritmos diferentes para resolver esta equação de equilíbrio:

- Equações de diferenças finitas de terceira ordem;
- Método de Euler;
- Solução Analítica.

O método escolhido para este trabalho é o método analítico que consiste numa aproximação por integrais permitindo a obtenção de resultados para qualquer espaço de tempo. Este algoritmo apenas necessita da temperatura da iteração anterior para efectuar o cálculo

$$\begin{aligned}
T_z^t = & \left( T_z^{t-\delta t} - \left[ \dot{m}_{inf} C_p T_\infty + \sum_{i=1}^{N_{surfaces}} h_i A_i T_{si} + \sum_{i=1}^{N_{zones}} \dot{m}_i C_p T_{zi} + \right. \right. \\
& \left. \left. \sum_{i=1}^{N_{sl}} \dot{Q} + \dot{m}_{sys} C_p T_{sup} \right] / \left[ \sum_{i=1}^{N_{surfaces}} h_i A_i + \sum_{i=1}^{N_{zones}} \dot{m}_i C_p + \dot{m}_{inf} C_p + \dot{m}_{sys} C_p \right] \right) \cdot \\
& \exp \left( - \frac{\sum_{i=1}^{N_{surfaces}} h_i A_i + \sum_{i=1}^{N_{zones}} \dot{m}_i C_p + \dot{m}_{inf} C_p + \dot{m}_{sys} C_p}{C_z} \delta t \right) + \\
& \left[ \frac{\sum_{i=1}^{N_{sl}} \dot{Q} + \sum_{i=1}^{N_{surfaces}} h_i A_i T_{si} + \sum_{i=1}^{N_{zones}} \dot{m}_i C_p T_{zi} + \dot{m}_{inf} C_p T_\infty + \dot{m}_{sys} C_p T_{sup}}{\sum_{i=1}^{N_{surfaces}} h_i A_i + \sum_{i=1}^{N_{zones}} \dot{m}_i C_p + \dot{m}_{inf} C_p + \dot{m}_{sys} C_p} \right]
\end{aligned} \tag{3.26}$$

## Capítulo 4

# Caso de Estudo

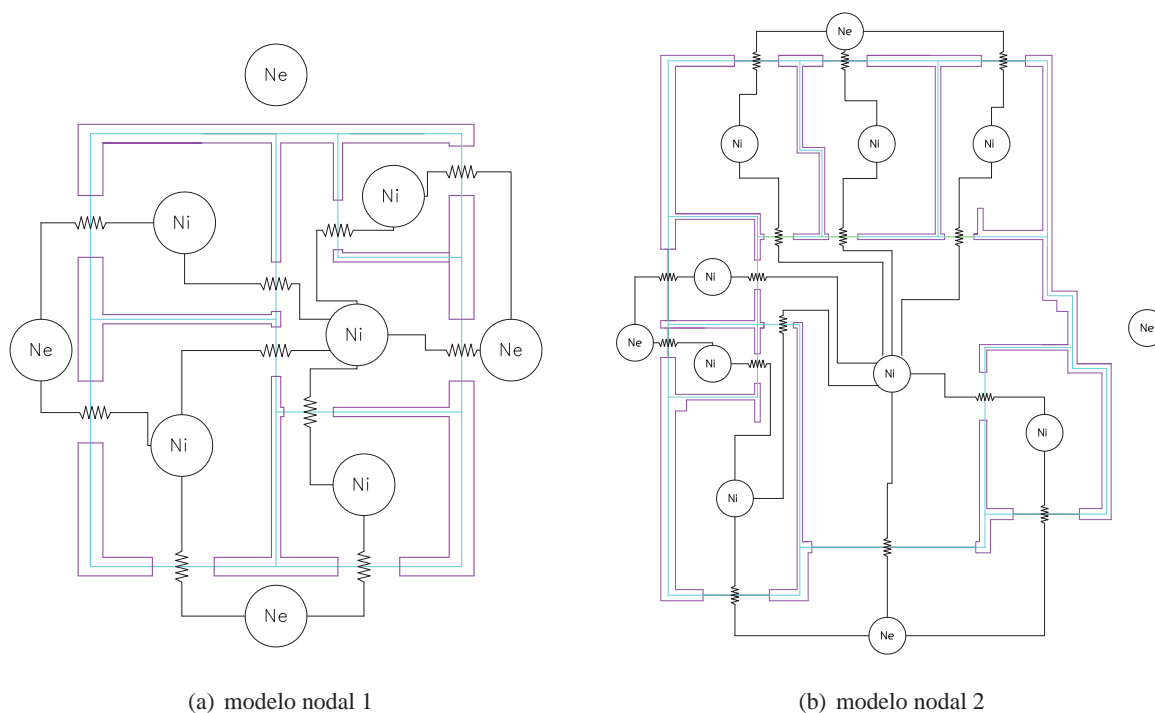
### 4.1 Introdução

Neste capítulo procede-se à definição dos casos de estudo nomeadamente dos modelos nodais utilizados. Na simulação computacional com o *EnergyPlus* tem-se em conta a geometria do edifício, os materiais da construção, os ganhos internos como a iluminação, a utilização de equipamentos e os hábitos ocupacionais dos habitantes.

### 4.2 Apartamentos e modelos nodais

Apresentam-se na figura 4.1 os modelos que servem de base ao estudo das variáveis da ventilação, o modelo 1 com  $46m^2$  é composto por dois quartos, uma sala, uma instalação sanitária e uma cozinha e corredor por onde se efectua a entrada no apartamento. O modelo 2, possui uma área total de  $146m^2$  e é constituído por três quartos, uma suite, uma instalação sanitária, uma cozinha e uma sala por onde se procede à entrada na habitação. Considerou-se em todas as simulações que os modelos têm todas as fachadas expostas ao vento, das quais apenas três possuem elementos envidraçados sendo a restante a fachada onde se encontra a porta de entrada, que é considerada estanque em todas as simulações, pois não se consideram as trocas de ar com a zona comum do edifício. O modelo 1 não é real pois foram acrescentadas janelas para poder identificar diferenças com o modelo 2.

Observando os modelos existe um nó que não efectua qualquer troca de massas de ar com o interior da habitação, este nó situa-se na fachada da porta de entrada. Em ambos os modelos existe um nó interior, que corresponde à assoalhada destinada à sala, que efectua trocas com as restantes divisões e com um nó externo.



Legenda	
$\text{W}$	Resistência das aberturas
Ne	Nós Externos
Ni	Nós Internos

Figura 4.1: Modelos Nodais

### 4.3 Caracterização do clima

As simulações são efectuadas com base nos dados de um ano climático de referência que contém por exemplo as informações referentes a temperatura do ar, velocidade e rumo do vento para cada altura do ano. Os ficheiros climáticos utilizados neste trabalho foram obtidos no *site* do departamento de energia dos Estados Unidos da América [5].

Para este estudo considera-se duas zonas climáticas uma pertencente à zona *A* (Bragança) e outra à zona *B* (Lisboa). Estas duas zonas são representativas de todo o território Português sendo a zona *A* referente a todas as localidades situadas numa faixa costeira com 5km de largura ou a altitudes superiores a 600m e a zona *B* é todo o território nacional exceptuando a zona *A*. Na tabela 4.1 apresenta-se os valores médios de temperatura velocidade do vento e direcção do vento das respectivas zonas ao longo de um ano obtidos através do *EnergyPlus*.



Tabela 4.1: Valores médios anuais das variáveis climatéricas referentes às zonas em estudo

	Bragança	Lisboa
Graus Dias [ $^{\circ}\text{C} \cdot \text{dia}$ ]	2704	1090
Velocidade média do vento [m/s]	3	5
Direcção predominante do vento [ $^{\circ}$ ]	190	205
Sentido predominante do vento	Norte-Sul	Norte-Sul

A temperatura média anual, assim como a velocidade do vento em Bragança apresenta valores médios inferiores aos de Lisboa. Para melhor percepção dos valores médios anuais do vento, apresenta a figura 4.2. Os valores de graus dias obtidos através do *EnergyPlus* são referentes a um período de um ano.

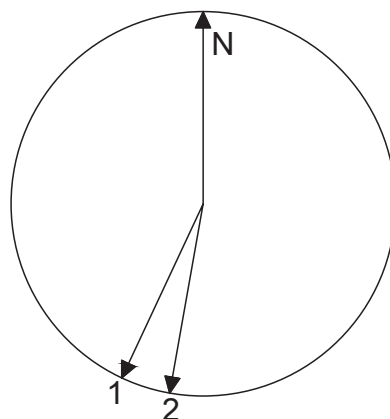


Figura 4.2: Direcção predominante do vento (1-Bragança; 2-Lisboa)

As direcções anuais predominantes do vento das duas regiões em estudo são semelhantes como se pode observar na figura 4.2. distanciando-se apenas por  $15^{\circ}$ .

#### 4.3.1 Temperatura exterior

Observa-se na figura 4.3 que a temperatura exterior em Bragança apresenta ao longo do tempo valores tendencialmente mais baixos que os valores de temperatura exterior de Lisboa. Analisando os valores retirados do ficheiro climático pode observa-se que a temperatura mais baixa e mais elevada ocorrem no ficheiro climático de Bragança com os valores de  $-1,9^{\circ}\text{C}$  e  $29,0^{\circ}\text{C}$  respectivamente. E as temperaturas de pico do ficheiro climático de Lisboa são de  $26,1^{\circ}\text{C}$  e de  $6,8^{\circ}\text{C}$ .

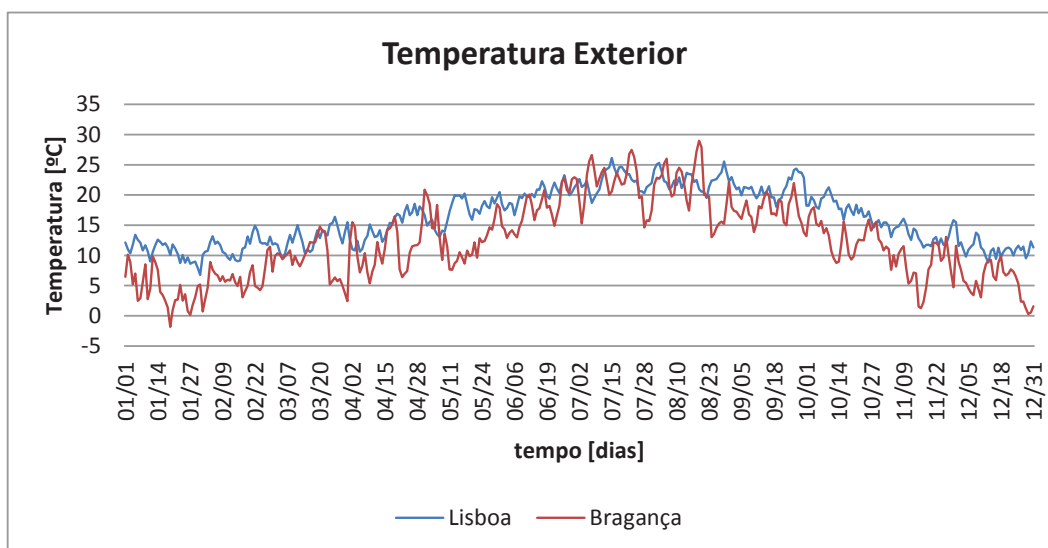


Figura 4.3: Evolução da temperatura média diária exterior ao longo do ano

### 4.3.2 Velocidade e direcção do vento

Na figura 4.4, observa-se a velocidade do vento para as duas zonas climáticas. Apesar do valor de pico, pertencer ao ficheiro climático de Bragança, com  $13\text{m/s}$  o valor médio da velocidade do vento em Lisboa é superior e o sentido predominante nas duas zonas é Norte-Sul.

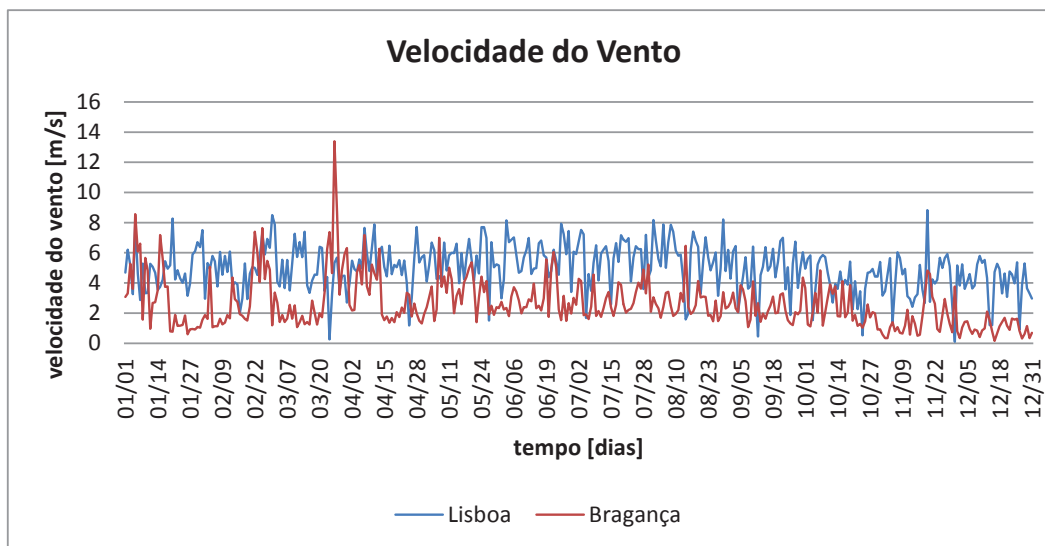


Figura 4.4: Evolução da velocidade média diária do vento ao longo do ano

Ao efectuar a leitura do gráfico presente na figura 4.4 é de notar que a região de Bragança tem maior potencial de ventilação natural por efeito de chaminé que Lisboa e que Lisboa por sua vez tem maior potencial de ventilação natural que Bragança por acção do vento.

## 4.4 Ganhos internos

Os ganhos internos correspondentes ao calor produzido pelos ocupantes, lâmpadas e equipamentos existentes no interior da habitação são factores importantes no balanço energético de um edifício. O *EnergyPlus* permite ao utilizador especificar os ganhos energéticos de vários tipos de sistemas, sistemas eléctricos, de gás entre outros. Os ganhos internos são compostos por ganhos de convecção, de radiação e condução nas suas respectivas proporções. O *EnergyPlus* trata os ganhos internos da seguinte forma: os ganhos por convecção influenciam directamente a temperatura da zona. Os ganhos por radiação são distribuídos pelas superfícies da zona, onde se transforma em ganhos por condução e de seguida reflectidos em quantidades menores de volta para a zona interior.

Neste trabalho os ganhos internos são constituídos apenas pelos equipamentos eléctricos, a iluminação e a ocupação dos habitantes discriminados nos tópicos seguintes. É de salientar que os valores dos ganhos internos referentes aos equipamentos e iluminação foram ambos forçados a  $1,5 \text{ W/m}^2$  para que os ganhos internos totais não se afastassem muito dos valores definidos pelo RCCTE, visto que o objectivo principal do trabalho não é avaliar os valores das necessidades energéticas obtidos mas sim efectuar comparações entre várias soluções.

### 4.4.1 Ocupação

O Padrão de ocupação é composto por uma família de  $n + 1$  elementos, onde  $n$  representa o numero de quartos, o que resulta numa família de 3 pessoas e numa de 5 para os modelos 1 e 2 respectivamente. O padrão de utilização para ambos os modelos partiu das seguintes pressupostos:

- Cada elemento frequenta apenas o seu quarto;
- A iluminação só é utilizada quando existem habitantes na fracção;
- A sala e a cozinha pode ser utilizada por todos os elementos ao mesmo tempo.

Os hábitos ocupacionais foram obtidos através de um valor médio, resultante de um conjunto de levantamentos efectuados a 3 famílias durante uma semana e de seguida adaptado para os modelos computacionais. Esta necessidade surge com a divergência no número de zonas, que os apartamentos possuem, não ser constante nos modelos computacionais nem nos apartamentos onde se efectuou o levantamento.

Como é comum em todas as famílias os hábitos alterarem entre os dias úteis e os restantes apresentam-se os calendários de ocupação divididos em dois (dias úteis e fins-de-semana/feriados). Na figura 4.5 pode observar-se a ocupação das habitações ao longo do tempo relativamente ao modelo 1. Para o modelo 2, que aumenta apenas o numero de quartos de solteiro para 3 e as instalações sanitárias para 2, o padrão de ocupação das zonas é exactamente a mesma de forma a garantir em ambos os modelos os mesmos ganhos internos por zona.

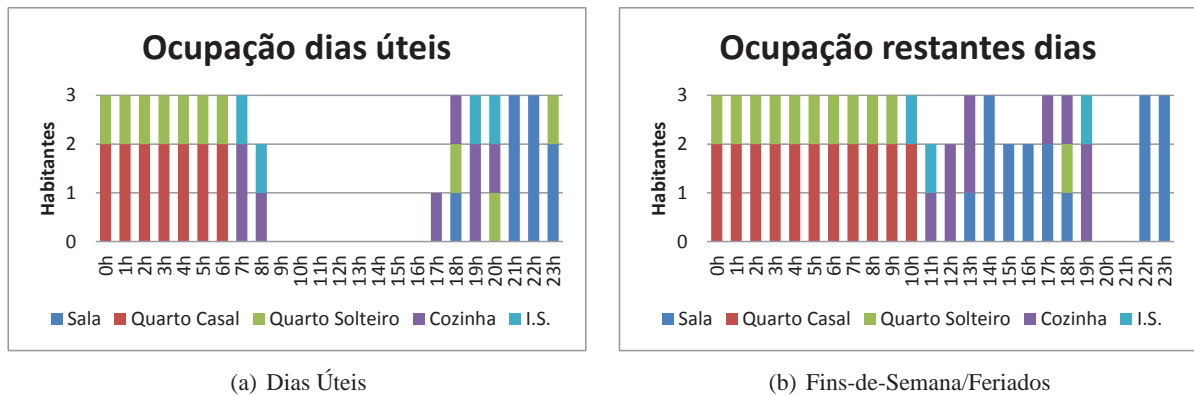


Figura 4.5: Gráficos Ocupacionais

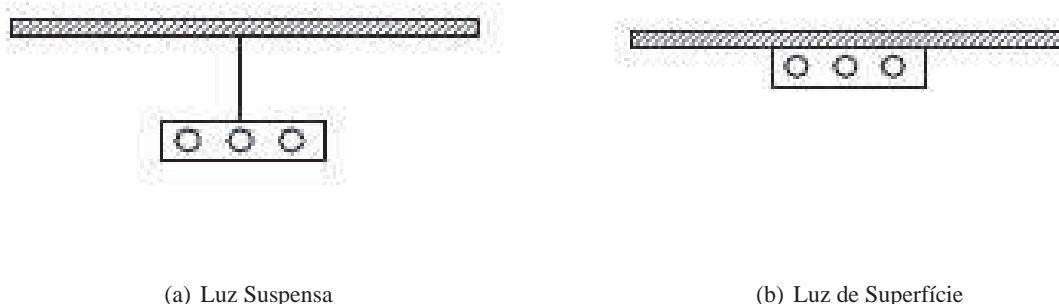
A produção de energia associada aos habitantes para cada zona é determinada em função dos seus hábitos e actividades como tal é utilizada a tabela referenciada no manual do *EnergyPlus, input output references*, com os valores em  $W/Pessoa$ . Na tabela 4.2 apresenta-se alguns valores utilizados na construção dos padrões de ocupação.

Tabela 4.2: Energia por pessoa referente a cada actividade[28]

Actividade	Energia [W/Pessoa]
Dormir	72
Permanecer sentado	108
Ler sentado	99
Trabalhar no Computador	117
Cozinhar	171 a 207
Limpezas	207 a 360

#### 4.4.2 Iluminação

O padrão de utilização de iluminação interior da fracção autónoma é desenvolvido a partir do padrão de ocupação. É definido um valor base de  $1,5W/m^2$  para todas as zonas definindo-se o padrão de iluminação com números fracionários entre 0 e 1, determinando a percentagem de iluminação que se utiliza em cada compartimento para cada hora. Desta forma garante-se que em ambos os modelos os ganhos energéticos relativamente à iluminação são iguais. A simulação permite optar pelo tipo de luz que está instalada em cada compartimento assim cada quarto tem uma luz suspensa no tecto e respectivos candeeiros de mesa e as instalações sanitárias e a cozinha possuem luzes montadas na superfície no tecto, figura 4.6.



(a) Luz Suspensa

(b) Luz de Superfície

Figura 4.6: Tipos de Luzes

De acordo com o manual do *EnergyPlus* para cada tipo de luz é necessário definir três campos que correspondem às seguintes variáveis:

- Fracção que retorna para o ar

Esta fracção corresponde à percentagem de calor que vai para o ar no nó de saída em contacto com outras zonas. Como nestas simulações os únicos pontos de ligação entre zonas são as portas interiores esta variável toma sempre o valor de zero.

- Fracção Radiante

Esta fracção corresponde ao calor que é transmitido para a zona através de ondas-longas. O programa calcula a quantidade desta radiação que é absorvida pelos elementos construtivos interiores de cada zona de acordo com a área vezes o produto da absorptância térmica das superfícies

- Fracção Visível

Esta fracção corresponde à percentagem de radiação visível. O programa calcula a quantidade que é absorvida pela zona através do produto da área dos elementos construtivos interiores com a absorptância solar destas superfícies.

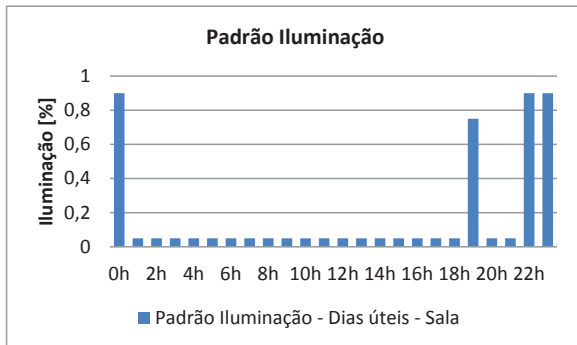
Os valores adoptados para as variáveis acima descritas encontram-se na tabela 4.3

Tabela 4.3: Valores aproximados para Fracção que retorna para o ar, fracção radiante e fracção visível de acordo com a ASHRAE

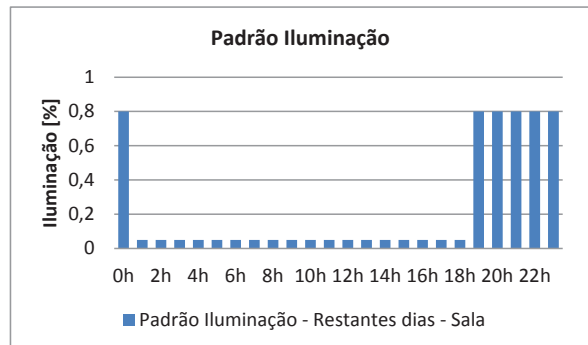
Tipo de iluminação	Suspensa	Superfície
Fracção que retorna para o ar	0	0
Fracção Radiante	0,42	0,72
Fracção Visível	0,18	0,18

No conjunto de gráficos seguinte apresenta-se os padrões de utilização de iluminação por compartimento e por tipo de dia. Em casos pontuais verifica-se a utilização de iluminação quando os habitantes não se encontram no apartamento, este facto deve-se à necessidade de compreender os valores de ganhos energéticos internos totais entre os  $5W/m^2$  e os  $7W/m^2$  (compreendido entre os valores para edifícios residenciais e comerciais definidos pelo RCCTE).

● Padrão Iluminação - Sala



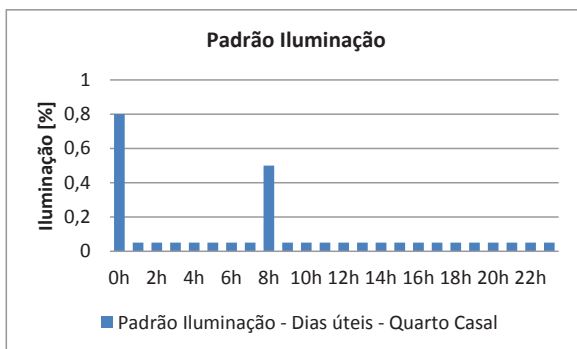
(a) Dias Úteis



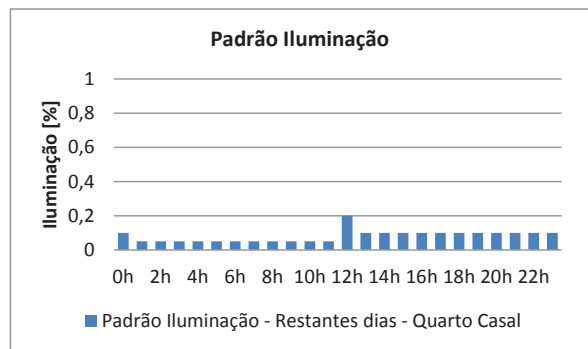
(b) Fins-de-Semana/Feriados

Figura 4.7: Gráficos Padrão de Iluminação - Sala

● Padrão de Iluminação - Quarto Casal



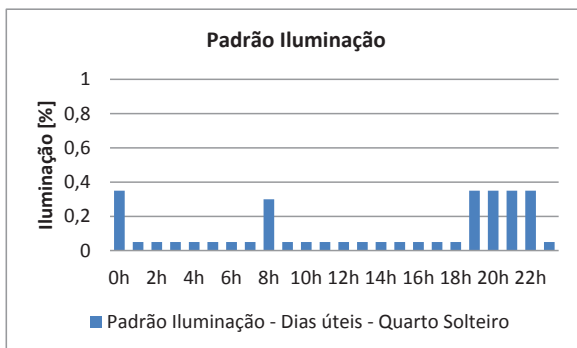
(a) Dias Úteis



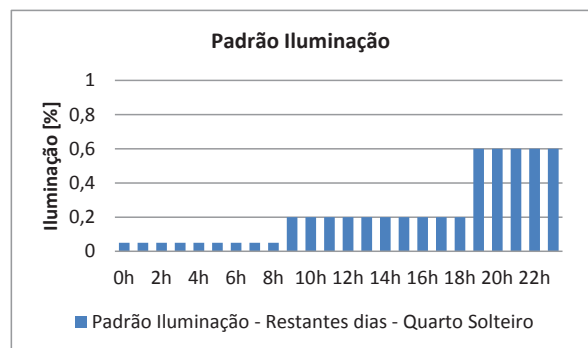
(b) Fins-de-Semana/Feriados

Figura 4.8: Gráficos Padrão de Iluminação - Quartos Casal

● Padrão de Iluminação - Quartos Solteiro



(a) Dias Úteis



(b) Fins-de-Semana/Feriados

Figura 4.9: Gráficos Padrão de Iluminação - Quartos Solteiro

● Padrão de Iluminação - Instalações Sanitárias

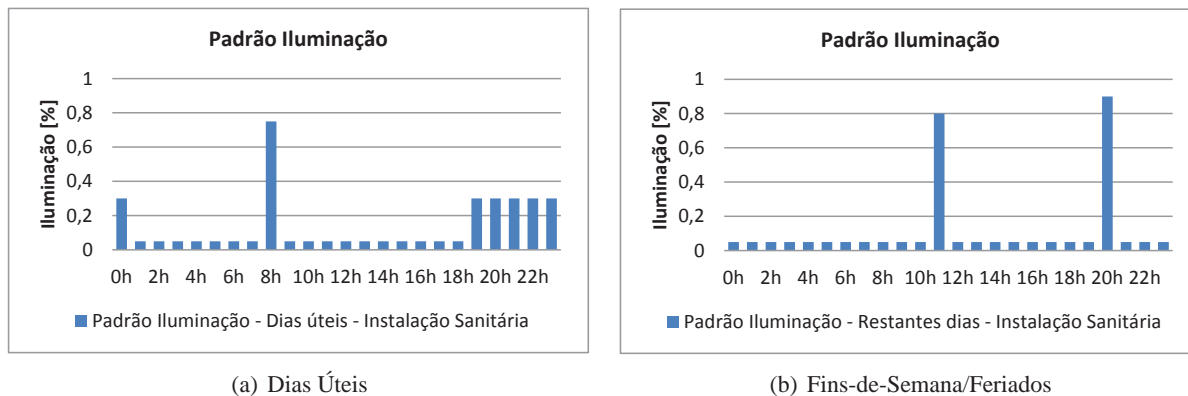


Figura 4.10: Gráficos Padrão de Iluminação - Instalações Sanitárias

● Padrão de Iluminação - Cozinha

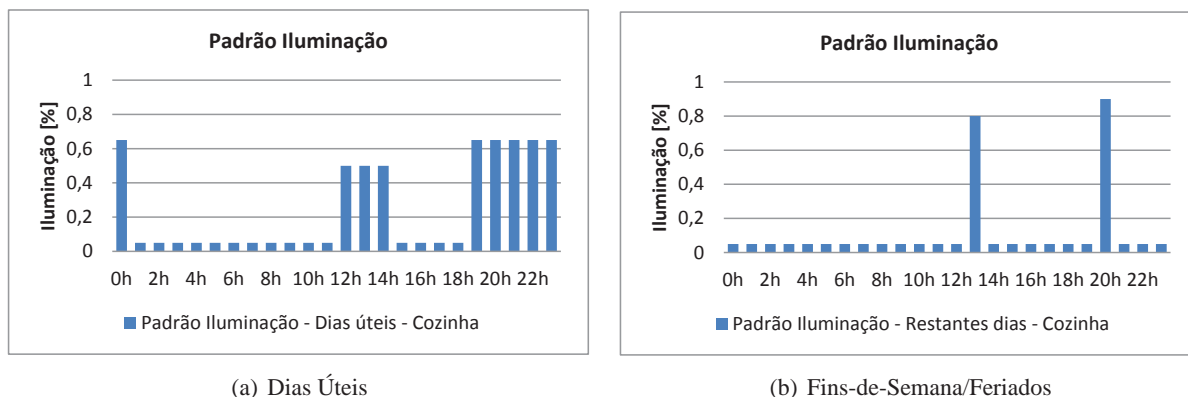


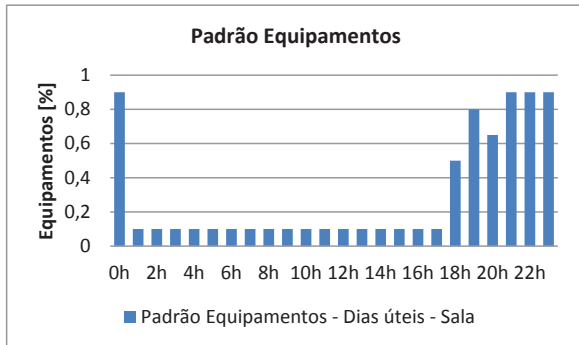
Figura 4.11: Gráficos Padrão de Iluminação - Instalações Sanitárias

4.4.3 Equipamentos

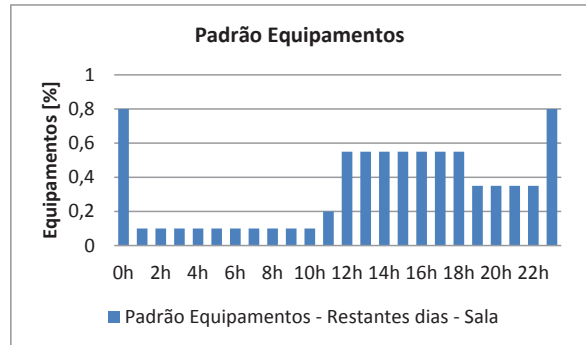
De uma forma semelhante ao padrão de iluminação, o padrão de utilização de equipamentos do apartamento foi obtido através dos hábitos ocupacionais. É definido um valor base de  $1,5W/m^2$  para todas as zonas e define-se no calendário de utilização apenas a percentagem que é utilizada em cada zona da habitação. Assim à semelhança dos ganhos internos com as luzes garante-se que para ambos os modelos os ganhos por área são iguais por zona.

Nos seguintes gráficos apresenta-se os padrões de utilização dos equipamentos separados por zona e por dias úteis e não úteis. Também nestes calendários foram feitos ajustes para garantir que os valores de ganhos internos não se afastavam do intervalo de  $5W/m^2$  e  $7W/m^2$  (Compreendido entre os valores para edifícios residenciais e comerciais definidos pelo RCCTE)

● Padrão de Equipamentos - Sala



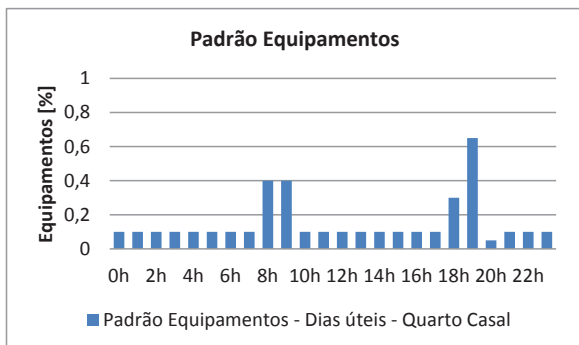
(a) Dias Úteis



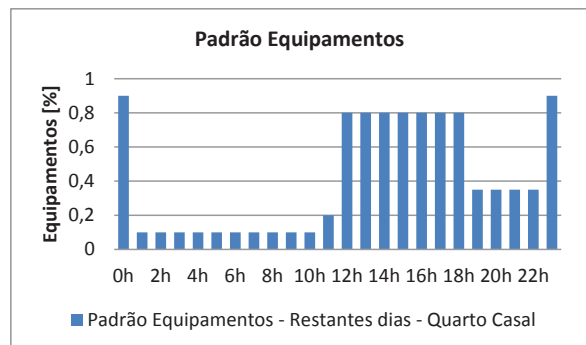
(b) Fins-de-Semana/Feriados

Figura 4.12: Gráficos Padrão de Equipamento - Sala

● Padrão de Equipamentos - Quarto de Casal



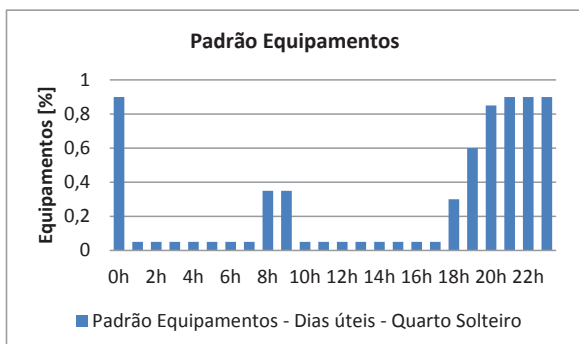
(a) Dias Úteis



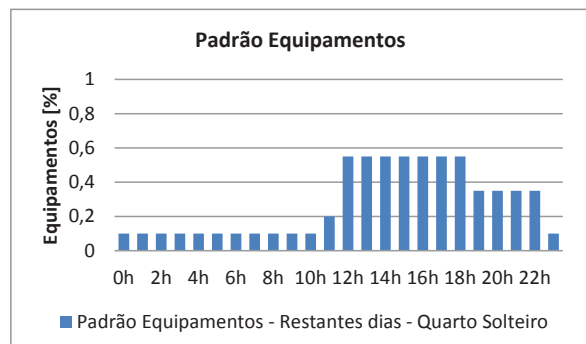
(b) Fins-de-Semana/Feriados

Figura 4.13: Gráficos Padrão de Equipamento - Quarto de Casal

● Padrão de Equipamentos - Quarto de Solteiro



(a) Dias Úteis



(b) Fins-de-Semana/Feriados

Figura 4.14: Gráficos Padrão de Equipamento - Quarto de Solteiro



- Padrão de Equipamentos - Cozinha

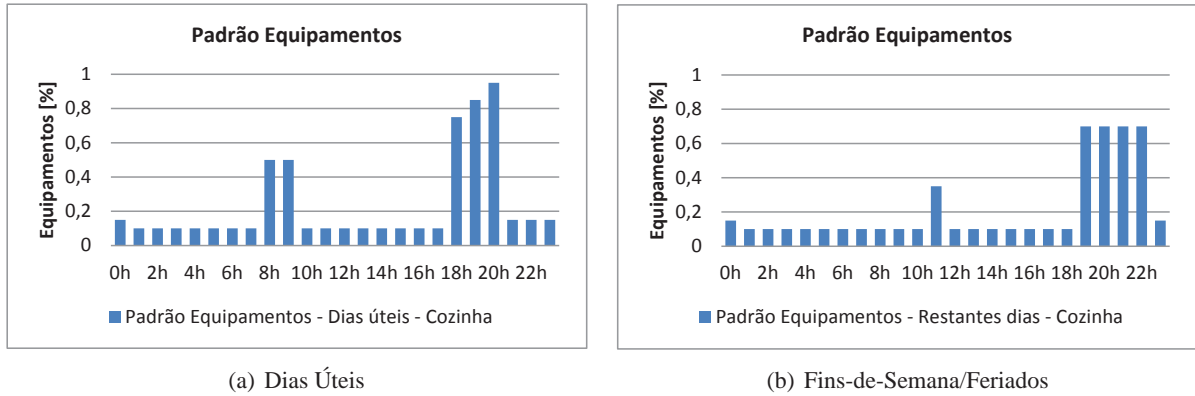


Figura 4.15: Gráficos Padrão de Equipamento - Cozinha

- Padrão de Equipamentos - Instalação Sanitária

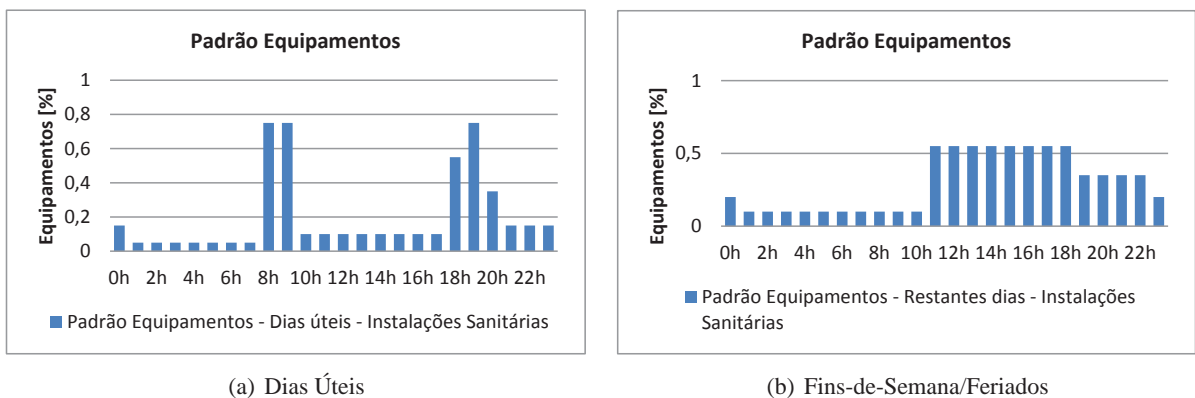


Figura 4.16: Gráficos Padrão de Equipamento - Instalação Sanitária

## 4.5 Coeficientes de pressão

Os valores utilizados para os coeficientes de pressão foram estimados através do *EnergyPlus* tendo como base a geometria do modelo. Ambos os modelos são simulados com características de "edifícios baixos" ou seja, a sua altura é menor que três vezes a menor largura. É definido no programa, através de um vector, as várias direcções que o vento pode tomar e para cada direcção e é calculado automaticamente os respectivos coeficientes de pressão através da equação de swami e chandra [6], tabela 4.4.

Tabela 4.4: Coeficientes de pressão - *EnergyPlus*

Direcção do Vento [°]	$C_{pNorte}$	$C_{pEste}$	$C_{pSul}$	$C_{pOeste}$
0	0,60	-0,44	-0,36	-0,44
30	0,47	0,12	-0,39	-0,68
60	0,12	0,47	-0,68	-0,39
90	-0,44	0,60	-0,44	-0,36
120	-0,68	0,47	0,12	-0,39
150	-0,39	0,12	0,47	-0,68
180	-0,36	-0,44	0,60	-0,44
210	-0,39	-0,68	0,47	0,12
240	-0,68	-0,39	0,12	0,47
270	-0,44	-0,36	-0,44	0,60
300	0,12	-0,39	-0,68	0,47
330	0,47	-0,68	-0,39	0,12

Refira-se que no cálculo dos coeficientes de pressão não foram tidos em conta obstáculos em torno do edifício, assim os coeficientes de pressão utilizados nas simulações são sempre os apresentados na tabela 4.4 ficando o fluxo de ar dependente da velocidade do vento a cada instante.

## 4.6 Período de análise

Considera-se para efeitos de análise um período com uma duração de um ano assim todos os valores retirados para análise são médias ou somas anuais. Os valores de temperatura e renovações horárias dos compartimentos são valores médios anuais e as variáveis de necessidades de aquecimento e arrefecimento são somas anuais. Desta forma possibilita-se um estudo comparativo entre diversas soluções de ventilação.

## 4.7 Envolvente exterior

As soluções construtivas utilizadas nos modelos baseiam-se nas construções portuguesas. Este trabalho não tem como objectivo verificar as propriedades dos materiais constituintes das alvenarias, pavimentos e coberturas em relação à ventilação, como tal mantém-se as mesmas características construtivas ao longo de todas as simulações.

Tabela 4.5: Materiais dos elementos construtivos

Elemento	Material	Espessura [m]	Coefficiente de transmissão térmica [ $W/m^2 \cdot C$ ]
Pavimento	Revestimento de Madeira	0,010	2,8
	Betão armado	0,200	
	Estuque Tradicional	0,015	
Parede Exterior	Reboco	0,030	0,5
	Tijolo 15	0,150	
	Caixa de ar	0,030	
	XPS	0,030	
	Tijolo 11	0,110	
	Reboco	0,020	
Parede Interior	Reboco	0,015	1,7
	Tijolo 11	0,110	
	Reboco	0,015	
Envidraçado	Vidro	0,006	2,5
	Caixa de ar	0,014	
	Vidro	0,006	
Porta Interior	Madeira	0,035	4,3

Todos os panos de alvenaria são considerados homogéneos desprezando-se as pontes térmicas. Considera-se para a parede exterior uma solução construtiva de parede dupla constituída por, alvenaria de tijolo com caixa de ar e isolamento térmico do tipo XPS no seu interior e reboco na faces exteriores . A parede interior é constituída apenas por alvenaria de tijolo rebocado em ambas as faces à semelhança da parede exterior. O pavimento e cobertura possuem um revestimento de madeira na camada superior e nas subjacentes uma camada de betão armado e estuque tradicional. Os envidraçados são de vidro duplo com caixa de ar no interior e a porta interior é de madeira.

Nas simulações são estudados diferentes configurações assim como diferentes tipos de material para as janelas, estas alterações são efectuadas exclusivamente alterando os valores de coeficientes de fluxo e expoente de fluxo desprezando as alterações térmicas que possam existir ao alterar o material da esquadria da janela.

## 4.8 Análise de sensibilidade

Como indicado anteriormente este trabalho centra-se no estudo de variáveis que afectam a ventilação natural. Nos tópicos seguintes procede-se à descrição das alterações efectuadas ao longo do estudo.

### 4.8.1 Zona climática

Cada zona tem as suas características climáticas, estando a ventilação natural dependente das condições exteriores é esperado que ao colocar o mesmo edifício em zonas distintas resultem valores diferentes. Tendo como base a norma portuguesa NP1037-1 escolheram-se duas zonas para efectuar as simulações, Bragança e Lisboa, sendo Lisboa considerada zona B e Bragança zona A.

### 4.8.2 Orientação do edifício

A orientação do edifício é um parâmetro importante no estudo da ventilação natural pois está-se dependente do vento e do local das aberturas para garantir uma taxa de renovação horárias no interior do edifício como tal neste trabalho tem-se em conta a orientação do edifício nos quatro principais pontos cardeais. No *EnergyPlus* a variável orientação é definida por valores numéricos referentes ao ângulo que o edifício faz com o Norte, assim o valores 0 e 90 correspondem respectivamente a edifícios orientados a Norte e a Este.

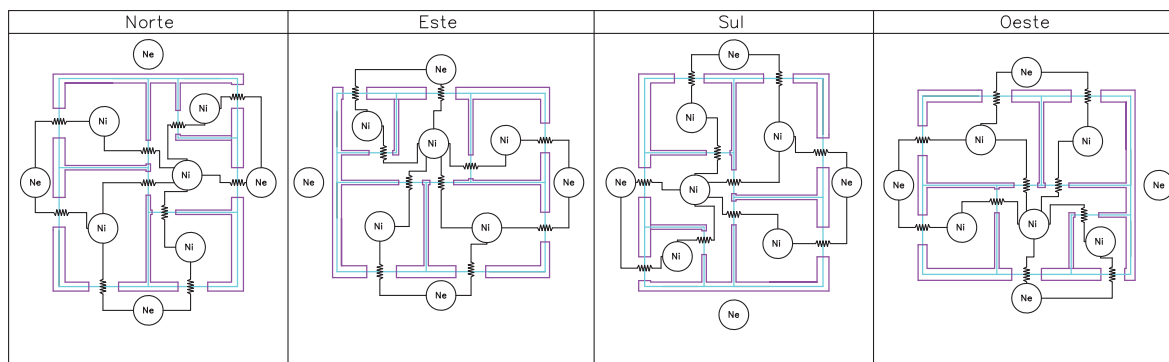


Figura 4.17: Orientações utilizadas - modelo 1

### 4.8.3 Tipo de ventilação

No presente trabalho são analisadas várias estratégias de ventilação natural, a ventilação transversal, unilateral e por infiltração entre elementos. A ventilação transversal, consiste na abertura dos elementos de vão exteriores e interiores durante um determinado tempo em simultâneo permitindo ao fluxo de ar atravessar a habitação. A ventilação unilateral caracteriza-se pela abertura de elementos de vão exteriores mantendo os interiores fechados de modo a que cada compartimento seja ventilado apenas pela sua abertura em contacto com o exterior. A infiltração consiste em manter os elementos de vão fechados ao longo da simulação contabilizando apenas o ar admitido pelas frinças entre elementos.

Nos modelos, para obtenção destas características, procede-se à utilização de calendários com valores booleanos definindo se as janelas ou portas interiores encontram-se abertas ou fechadas, sendo o valor 1 para aberto e o valor 0 para fechado. Assim, para obter uma ventilação transversal as portas interiores admitem-se sempre abertas e para uma ventilação unilateral admitem-se sempre fechadas por outro lado para simular ventilação apenas por infiltração considera-se as portas interiores sempre abertas e as janelas em contacto com o exterior sempre fechadas.

Neste trabalho também é tido em conta um tipo de ventilação regulamentar diferente das restantes onde, não é contabilizado o ar proveniente do exterior de um modo "natural" como os restantes meios de ventilação em estudo mas sim, obrigando a que o modelo apresente um número pré-definido de renovações horárias observando apenas as necessidades energéticas que o modelo apresenta para manter a temperatura dentro da gama confortável. Este conjunto de simulações serve essencialmente de base comparativa aos restantes modelos.

#### 4.8.4 Duração do processo de ventilação

Os valores mínimos para renovações horárias nas habitações estão definidos pelo RCCTE como  $0,6h^{-1}$  valor que, segundo o mesmo documento, garante o conforto e qualidade do ar interior. Assim são efectuadas várias simulações para obtenção de um horário que aproxime as taxas de renovação horárias dos modelos às taxas de renovação horárias regulamentares. Foram efectuadas simulações em que a ventilação ocorre durante 24, 12, 2, 1, e 0,5 horas apresentado os resultados na tabela 4.6 chegando-se à conclusão que uma ventilação de 30 minutos diária devolve valores muito próximos dos regulamentares e para ventilações com durações diárias superiores a 2 horas atingem-se valores muito elevados.

Tabela 4.6: Duração de Ventilação

Duração de Ventilação	24h	12h	2h	1h	0,5h
rph	23,3	11,1	2,1	1,2	0,7

#### 4.8.5 Altura base

Como referido anteriormente no capítulo 2, o vento varia exponencialmente com a altura (em ambientes urbanos o vento pode não variar exponencialmente com a altura mas neste trabalho não foram tidos em conta obstáculos em torno do edifício) como tal, para o estudo desta variável atribui-se às simulações diferentes cotas em concordância com a norma portuguesa NP 1037-1. A norma prevê situações onde os vãos tenham cotas até aos  $80m$ . Para situações em que as alturas das janelas ultrapassem os  $80m$  a determinação da acção do vento requer estudos mais detalhados.

Denomina-se altura acima do solo à cota média do solo no local de construção até ao centro da janela. Assim efectua-se o estudo para quatro alturas distintas que correspondem a edifícios com 3, 6, 9 e 20 pisos.

Com o aumento da velocidade do vento em função da altura, é de esperar que mantendo as janelas abertas o mesmo espaço de tempo as renovações também aumentem em função da altura base.

Para proceder ao estudo da variação da altura base altera-se no *EnergyPlus* a cota dos elementos construtivos pois ao tratar-se sempre de um piso intermédio não existe a necessidade de alterar os materiais para pisos em contacto com o solo ou junto à linha cércea.

#### 4.8.6 Rugosidade aerodinâmica

Tendo em conta que a rugosidade aerodinâmica do terreno altera o perfil da velocidade do vento foram efectuadas simulações que consideram, a par da norma NP1037-1, três situações distintas considerando assim, locais situados no interior de zonas urbanas que na maioria contenham edifícios de médio ou grande porte (Tipo I), locais periféricos às zonas urbanas (Tipo II) e locais situados em zonas planas sem vegetação de grande porte (Tipo III). A variação da rugosidade do terreno e a existência de obstáculos nas imediações do edifício alteram os coeficientes de pressão e por sua vez a forma como o edifício ventila. O *EnergyPlus* prevê cinco tipos de rugosidade distintos sendo apenas utilizados três para este

trabalho pois são os correspondentes aos tipos de rugosidade apresentados na Norma Portuguesa NP 1037-1. Essa correspondência é apresentada na tabela 4.7.

Tabela 4.7: Variáveis *EnergyPlus* referentes à rugosidade aerodinâmica

NP1037-1	<i>EnergyPlus</i>
Tipo I	City
Tipo II	Suburbs
Tipo III	Country

#### 4.8.7 Elementos de vão

O objecto referente aos elementos de vão possui várias variáveis entre elas o factor de abertura, coeficiente e expoente de fluxo. O factor de abertura corresponde à área da janela que se encontra aberta no momento que se efectua a ventilação o que, para uma janela de correr de duas folhas pode variar entre zero, encontrando-se fechada e 0,5 totalmente aberta. Esta variável pode tomar outros valores como por exemplo nas portas interiores que quando se encontram abertas tomam o valor 1 pois o fluxo de ar pode passar na totalidade da área do elemento.

Os coeficientes e expoente de fluxo são alterados consoante o tipo de material em estudo tendo por base as tabelas de Lidammet [25]. Cada elemento de vão constituído por materiais distintos permite que o ar o passe de forma diferente. Assim efectua-se um conjunto de simulações para o estudo desta variável com os valores apresentados na tabela 4.8. Todas as simulações efectuadas, que não são representativas do estudo dos elementos de vão utilizam os valores pre-definidos do *EnergyPlus*.

Tabela 4.8: Coeficientes e Expoentes de Fluxo segundo material da Janela

	<i>EnergyPlus</i>	Madeira sem vedante	Metal Sem vedante	Metal com vedante	PVC com vedante
Coeficientes de fluxo	0,65	0,66	0,66	0,66	0,66
Expoentes de Fluxo[kg/s.m]	0,001	0,000202	0,00028	0,000101	0,000101

Segundo Lidammet o coeficiente de fluxo pode variar entre 0,5 e 1 consoante os elementos de vão ou sua composição como tal também se efectuam simulações para o estudo dessa variável. São efectuadas simulações para os seguintes valores: 0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9 e 1,0.

## 4.9 Tratamento dos dados

Para cada simulação apresentam-se três *outputs* um referente à taxa de ventilação horária anual (*rph*) do apartamento, e os restantes referentes às necessidades de aquecimento e arrefecimento do mesmo. Os modelos inseridos no *EnergyPlus* são divididos por zonas, onde cada compartimento corresponde a uma

zona diferente, assim o programa de cálculo devolve um valor de renovação horária, de necessidades de aquecimento e arrefecimento por cada zona. Para apresentar um valor representativo do apartamento tratam-se os *outputs* através de uma média ponderada, equação 4.1. Os valores das necessidades de aquecimento e arrefecimento são tratados de forma semelhante.

$$rph_{apartamento} = \frac{\sum rph_{zonai} * Volume_{zonai}}{\sum Volume_{zonai}} \quad (4.1)$$

O programa computacional devolve as variáveis de necessidades de aquecimento e arrefecimento em Joules para apresentar os valores com as unidades iguais às do RCCTE é necessário proceder ao seguinte cálculo:

$$Necessidades[kWh/m^2] = \frac{N[Joules]}{3600000 * Area} \quad (4.2)$$





## Capítulo 5

# Resultados

O presente capítulo apresenta inicialmente os resultados referentes aos casos base dos modelos estudados, renovações horárias, necessidades de aquecimento e de arrefecimento e seguidamente os resultados obtidos com as trocas dos parâmetros descritos no capítulo 4.

### 5.1 Modelos base

Tal como indicado no capítulo 1 o objectivo principal é estudar diversos parâmetros na ventilação natural e a sua influência no desempenho energético do edifício. Para ambos os modelos base parte-se dos seguintes pressupostos: considera-se que este estão, a uma altura base de zero metros, situado num terreno com rugosidade aerodinâmica tipo II, na zona de Lisboa, orientado a Norte e um calendário de ventilação de trinta minutos horários de manhã, os factores de abertura são de 0,5 para janelas e de 1 para portas e os coeficientes e expoentes de fluxo são os pré-definidos pelo *EnergyPlus*.

Tabela 5.1: Parâmetros adoptados para o modelo base

Parâmetro	Considerações iniciais
Altura Base	0 metros
Orientação	Norte
Zona Climática	Zona B (Lisboa)
Rugosidade aerodinâmica	Tipo II
Período de ventilação	30 minutos / manhã
Classe de exposição	EXP 2
Tipo de ventilação	Transversal
Configuração dos envidraçados	Pré-definidos pelo E+

Os valores obtidos para o modelo base de cada uma das configurações são apresentados na tabela 5.2

Tabela 5.2: Resultados dos Modelos Base

	$r_{ph} [h^{-1}]$	$N_{aquecimento} [kWh/m^2.ano]$	$N_{arrefecimento} [kWh/m^2.ano]$
Modelo base 1	0,7	33	12
Modelo base 2	0,8	35,5	24,5

Os valores a nível energético não são comparáveis nesta fase pois, apesar de ambos os modelos estarem orientados a norte as janelas encontram-se em fachadas distintas. A nível de renovações horárias o valor do modelo 2 é superior devido às áreas das janelas serem maiores.

## 5.2 Influência da orientação

A orientação é bastante influente na ventilação pois determina se os elementos de vão, a dada altura, permitem a entrada ou saída de ar nos compartimentos. Ao alterar a orientação do edifício está-se a desassociar os coeficientes de pressão das respectivas fachadas passando a estar associados a outras, por exemplo, quando o edifício está orientado a Norte, a fachada Norte está associada ao  $C_{p_{Norte}}$  e quando se altera a orientação para Este a fachada que anteriormente era a fachada Norte passa a ser a fachada Este e passa a estar associada ao  $C_{p_{Este}}$ .

As figuras 5.1, 5.2 e 5.3 apresentam, em função da altura, os valores de renovações horárias e necessidades energéticas para as diferentes orientações.

A análise atenta dos gráficos 5.1 permite tirar a conclusão que existe um aumento nas renovações horárias quando o edifício se encontra orientado a Norte e Este para o modelo 1 e a Norte e a Sul para o modelo 2. Em ambos os casos coincide com a existência de uma área significativa de envidraçados orientados a Sul. Como o vento predominante ao longo do ano tem o sentido Norte-Sul, a fachada que se encontra orientada a sul toma valores de  $C_{p_{Sul}}$  negativos 71% do tempo promovendo assim, a saída de ar nesta fachada o que contribui positivamente para o funcionamento da ventilação transversal sabendo que as restantes fachadas possuem  $C_p$ 's positivos.

Na sequência da análise da figura 5.2 conclui-se que à semelhança do que acontece nas taxas médias anuais de renovações horárias, as necessidades energéticas de aquecimento também são superiores quando o apartamento se encontra orientado a Norte e a Este. Apesar de apresentarem os mesmos valores de renovações horárias, no modelo 1 com altura base zero, o edifício orientado a Norte apresenta necessidades energéticas superiores em 10% comparativamente com o verificado na orientação a Este.

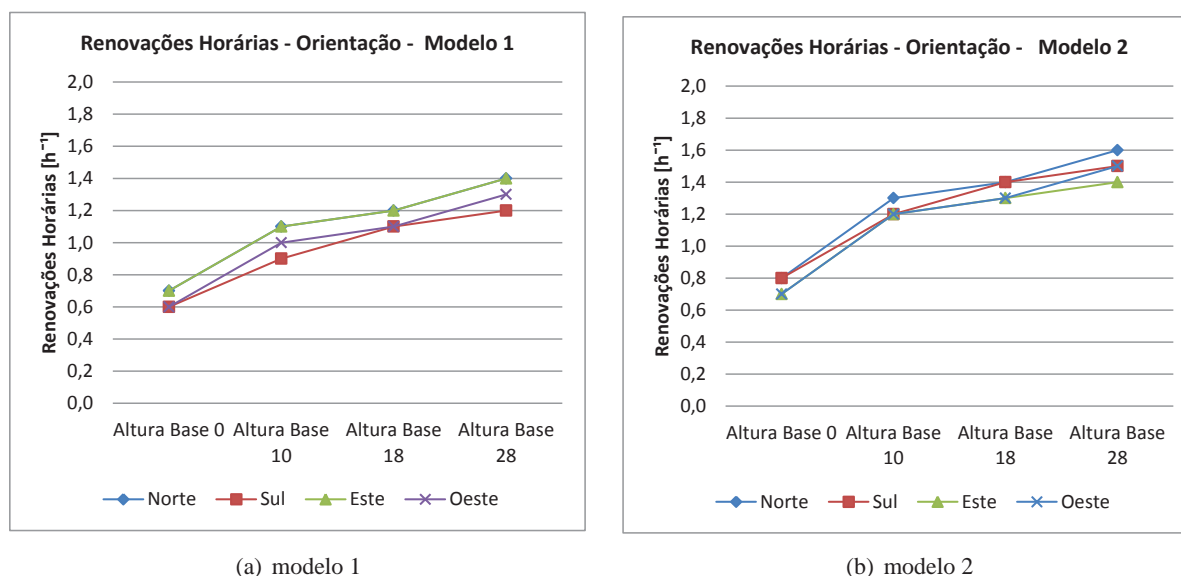


Figura 5.1: Renovações Horárias - Orientação

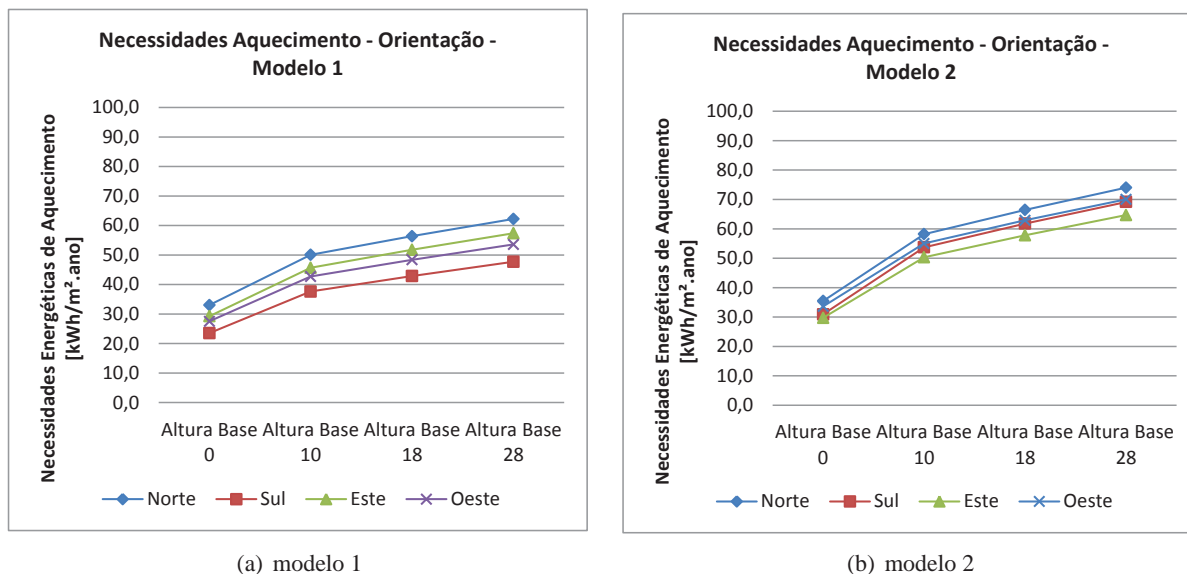


Figura 5.2: Necessidades de Aquecimento - Orientação

O mesmo acontece com as orientações a Oeste e a Sul que apresentam um valor de  $rph = 0,6$  mas as necessidades da orientação Oeste são 20% superiores à orientação Sul.

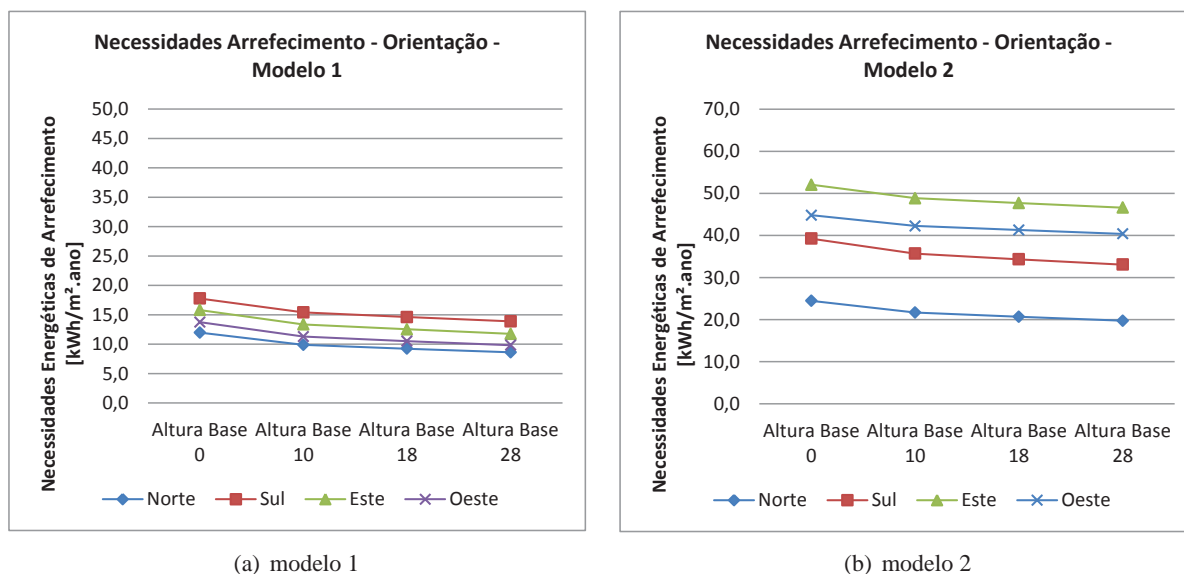


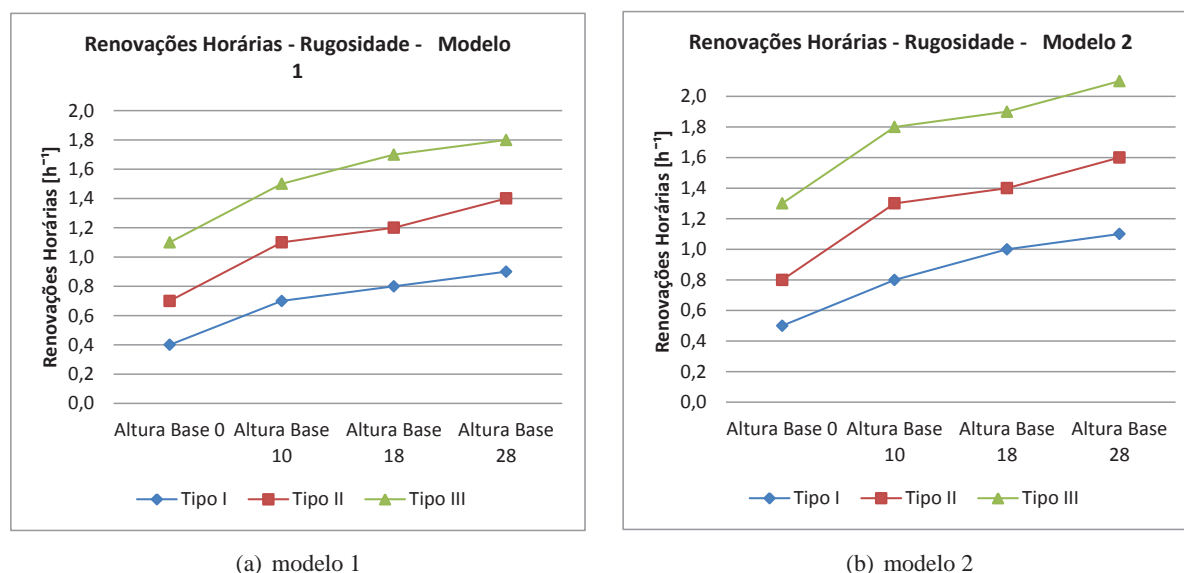
Figura 5.3: Necessidades de Arrefecimento - Orientação

Como se pode observar a partir dos resultados apresentados na figura 5.2, é de notar que a orientação Oeste apresenta menores necessidades de aquecimento que as orientações Norte e Este. No conjunto de gráficos referente às necessidades de arrefecimento, onde seria esperado apresentar valores superiores a estas orientações, apresenta valores inferiores na ordem dos 15%.

### 5.3 Influência da rugosidade do terreno

A rugosidade aerodinâmica do terreno apesar de não alterar as características do modelo, exerce uma influência na velocidade do vento, mediante correcções, que incide sobre as fachadas do edifício. São tidas em conta neste conjunto de simulações três rugosidades distintas de acordo com a classificação da NP 1037-1, Tipo I, Tipo II e Tipo III sendo o Tipo I a maior rugosidade e o Tipo III a menor. A escolha destes parâmetros influencia a correcção da velocidade do vento presente no ficheiro climático.

O desempenho da ventilação é afectado por este factor (como se pode observar na figura 5.4), dado que a diminuição da rugosidade tem como efeito o aumento da taxa de renovações horárias da fracção autónoma. Em ambos os modelos, para uma altura base de zero e uma rugosidade do Tipo I, a taxa média anual de renovações horárias não atinge o valor mínimo exigidos pelo RCCTE. Para a rugosidade do Tipo III no entanto, verificam-se valores superiores ao dobro do mínimo regulamentar.



(a) modelo 1

(b) modelo 2

Figura 5.4: Renovações Horárias - Influência da Rugosidade

Relativamente às necessidades energéticas de aquecimento, o seu valor aumenta com o aumento da altura e com a diminuição da rugosidade, o caso que possui menores necessidades energéticas de aquecimento é o que apresenta as seguintes características: altura base zero e rugosidade tipo I, e o que possui maiores necessidades é o de altura base 28 e rugosidade tipo III, que atinge um valor de necessidades energéticas 300% superior ao do caso anterior.

Para as mesmas alturas verificam-se diferenças de 60% entre o Tipo I e o Tipo II para as alturas mais baixas e de 40% para as alturas mais altas. Já entre o Tipo II e Tipo III existe uma diferença de 50% para as alturas mais baixas e de 30% para as alturas mais altas. Deste modo, pode concluir-se que a variação entre o Tipo II e tipo III é 10% inferior à variação entre o tipo I e tipo II.

O desenvolvimento dos gráficos das necessidades de arrefecimento é semelhante nos dois modelos e como se pode observar na figura 5.6, à medida que a rugosidade diminui, as necessidades energéticas diminuem. Como era expectável dado que as necessidades energéticas de aquecimento aumentam.

Comparando o Tipo I e o Tipo II, a diferença é de 20% para todas as alturas. No caso dos Tipos II e III, a sua diferença é de 20% para as alturas mais baixas e de 10% para as alturas mais altas.

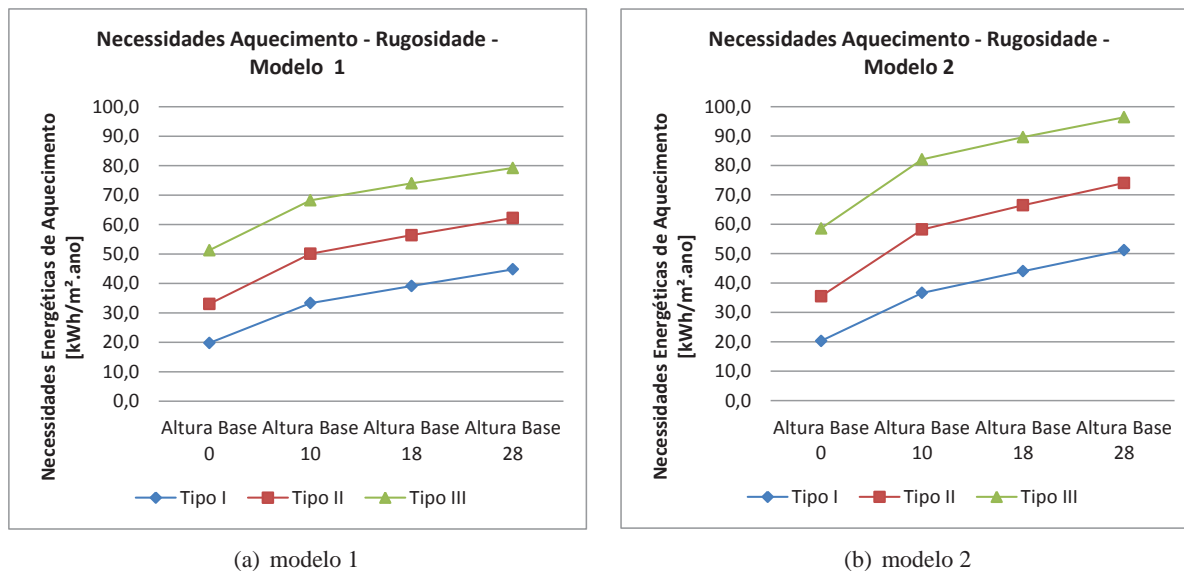


Figura 5.5: Necessidades de Aquecimento - Influência da Rugosidade

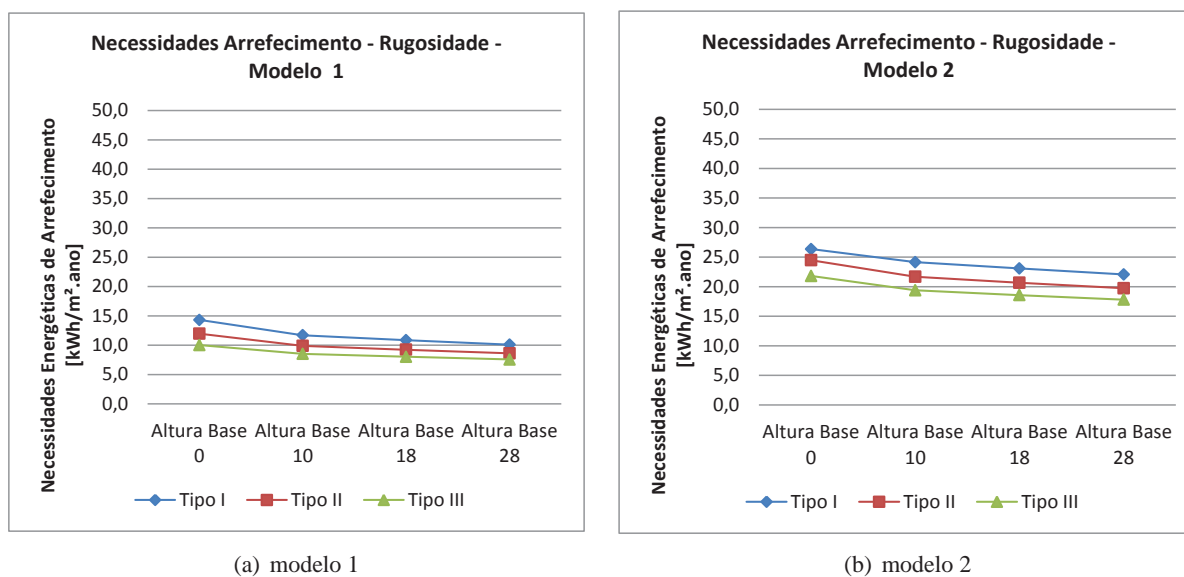


Figura 5.6: Necessidades de Arrefecimento - Influência da Rugosidade

## 5.4 Influência do tipo de região

De modo a averiguar a influência da região foi efectuado um conjunto de simulações alterando apenas as características do local onde este se encontra inserido

Através da análise do conjunto de gráficos apresentados verificam-se alterações significativas entre as zonas climáticas em termos de valores de taxas de renovação horárias quando se implementa o edifício em Bragança (região A). O modelo 1 apresenta uma diminuição de 80% para uma altura base de zero metros e uma diminuição de 120% para uma altura base de vinte e oito metros atingindo apenas os valores regulamentares na região A, para uma altura base de 18 metros. A disparidade de valores também é evidente no modelo 2, embora apresente diferenças menos significativas, 50% para uma altura base de zero metro e 110% para a maior altura base analisada. No modelo 2 o único caso que não cumpre a renovação de ar regulamentar é para uma altura base zero. Conclui-se assim que, para cumprir o mínimo aconselhável pelo RCCTE ter-se-ia de aumentar o período em que as janelas se encontram abertas.

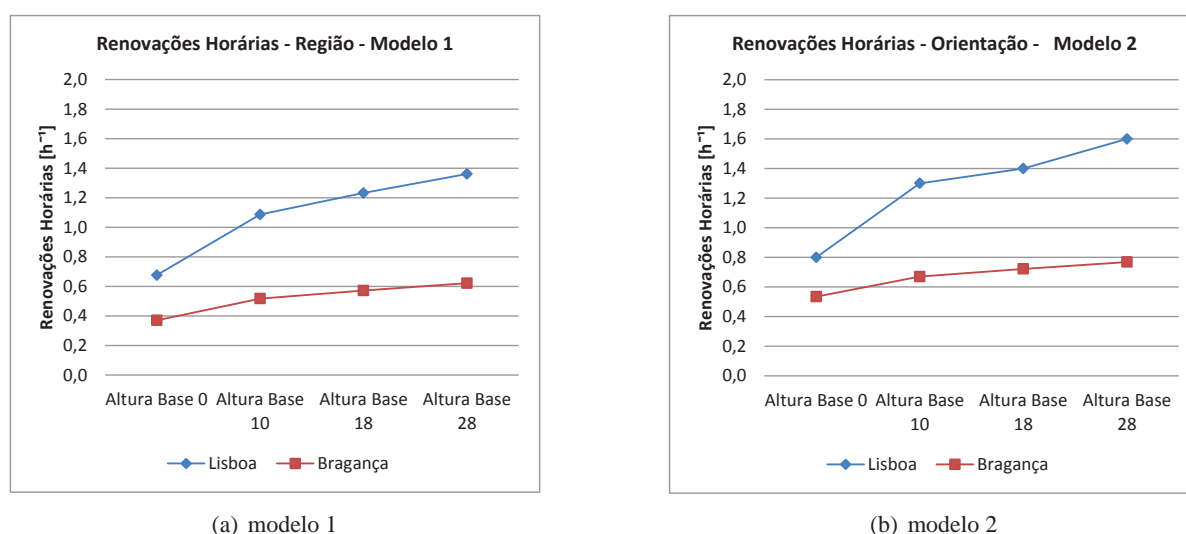


Figura 5.7: Renovações Horárias - Região

As necessidades energéticas do modelo inserido em Lisboa (região B) são, na maioria das vezes, inferiores às de Bragança. Como se pode verificar ao analisar os gráficos 5.8 as necessidades energéticas quando os modelos estão inseridos em Lisboa tendem a aproximar-se dos valores energéticos de Bragança para alturas mais elevadas. Ao alterar o ficheiro climático não se altera apenas uma variável como nos restantes casos, está a alterar-se a velocidade do vento, a sua direcção e a temperatura exterior. O ficheiro climático de Bragança apresenta temperaturas exteriores inferiores às de Lisboa, assim como velocidades do vento. Apesar de entrar menos quantidade de ar novo nas zonas interiores com temperaturas mais baixas as necessidade de aquecimento são maiores sendo isso evidente nas alturas mais baixas pois, para alturas mais altas, aumenta-se a velocidade do vento. Como o ficheiro climático de Lisboa tem velocidades de vento superiores, apesar da temperatura do ar exterior ser maior, o caudal é superior, o que faz com que as necessidades para alturas superiores sejam muito semelhantes.

No modelo 1 as necessidades de aquecimento de Bragança partem, de uma altura base de zero metros, com um valor 40% superior ao de Lisboa e chegam para uma altura base de 28 metros com uma diferença de 0%. Já no modelo 2, para a altura máxima Lisboa apresenta necessidades energéticas superiores em 10%, partindo à semelhança do modelo anterior com um valor inferior a Bragança em 40%.

As necessidades energéticas de arrefecimento de Lisboa são sempre superiores em relação às de Bragança, apresentando valores superiores para uma altura base de zero metros em 30%, e para uma

altura base de 28 metros de 20%. No modelo 2 a tendência dos resultados é semelhante, Lisboa superior a Bragança, existindo uma diferença para a menor e maior altura base de 55% e de 43% respectivamente. Observando a figura 5.9 dos dois modelos conclui-se que as necessidades energéticas de Lisboa diminuem mais, em relação à altura, do que as de Bragança, reduzindo em Lisboa 40% e 20% e em Bragança 30% e 10%, para os modelos 1 e 2 respectivamente.

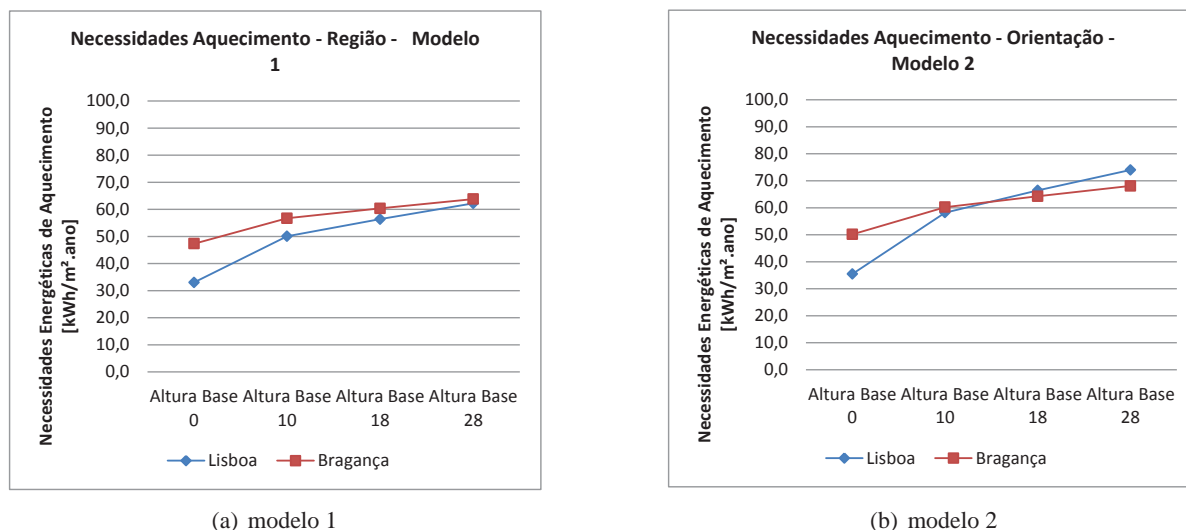


Figura 5.8: Necessidades de Aquecimento - Região

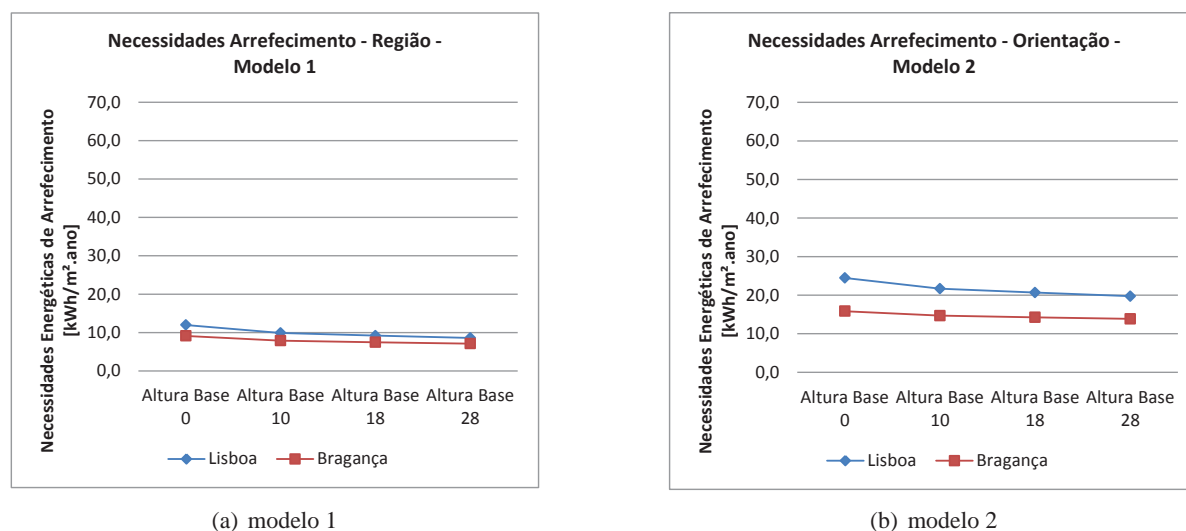


Figura 5.9: Necessidades de Arrefecimento - Região

## 5.5 Influência do período de ventilação

A ventilação natural está muito dependente da ocupação dos habitantes e dos seus hábitos assim, fez-se um conjunto de simulações para analisar a alteração do horário em que é feita a ventilação, tendo em consideração a ocupação da fracção autónoma, com o objectivo de verificar qual o melhor horário para

a renovação de ar a níveis energéticos. Deste modo, a melhor situação seria abrir as janelas quando a temperatura exterior é superior à interior, no Inverno, e quando a mesma temperatura é inferior, no Verão. Dado que tal não é viável apenas com a utilização dos ocupantes, escolhe-se um horário plausível ao longo de todo o período de simulação. Assim, admite-se que a ventilação é efectuada durante o mesmo espaço de tempo que o modelo base mas, em alturas do dia diferentes. Foram adoptados os seguintes períodos: 30 minutos durante a noite e um tipo de ventilação mais selectivo onde se procede à abertura das janelas 30 minutos durante a manhã no Inverno e 30 minutos durante a noite no Verão.

Para todos os períodos de ventilação é possível garantir-se a ventilação mínima regulamentar, com uma abertura de 30 minutos diários de todas as janelas do apartamento. Não se verifica alterações significativas nas renovações horárias entre os vários períodos analisados.

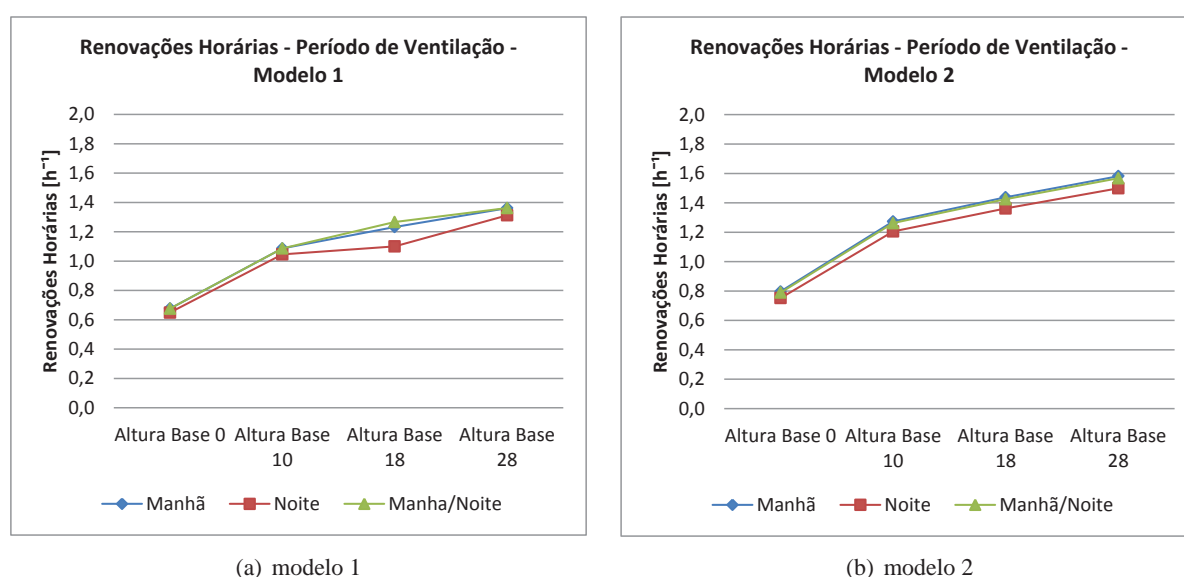


Figura 5.10: Renovações Horárias - Período de Ventilação

Relativamente às necessidades energéticas, o período de ventilação nocturno é o que apresenta melhor desempenho energético com valores mais baixos na ordem dos 15% (os restantes períodos analisados não apresentam alterações significativas entre si). Este valor é mais reduzido devido ao facto da temperatura exterior ser mais elevada nas horas em que é feita a ventilação, não sendo necessária tanta energia para o equilíbrio de temperaturas, como se pode observar na figura 5.11.



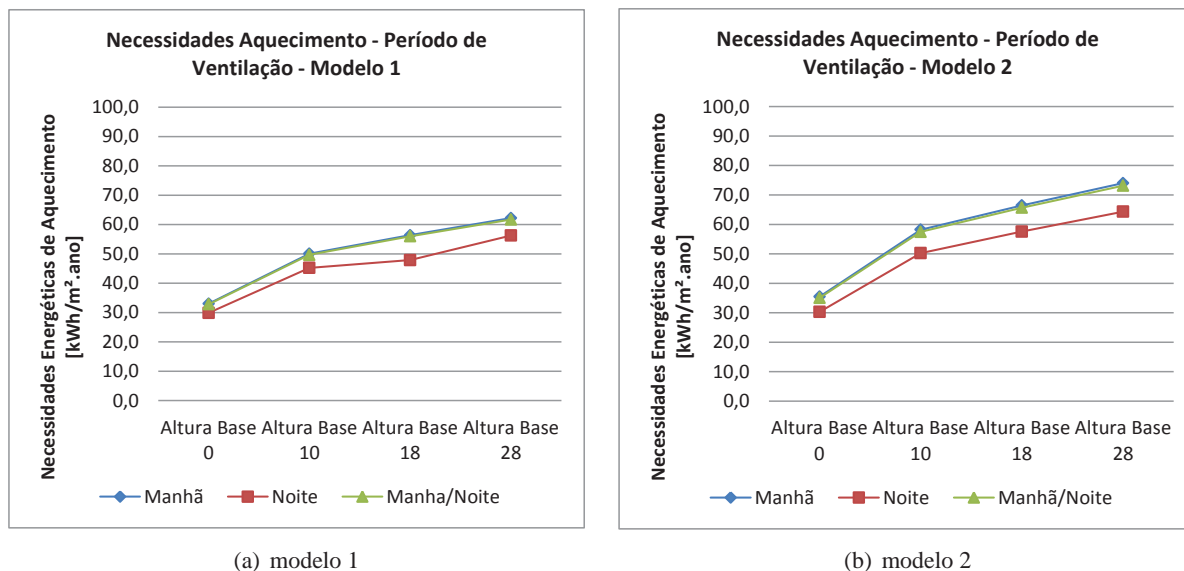


Figura 5.11: Necessidades de Aquecimento - Período de Ventilação

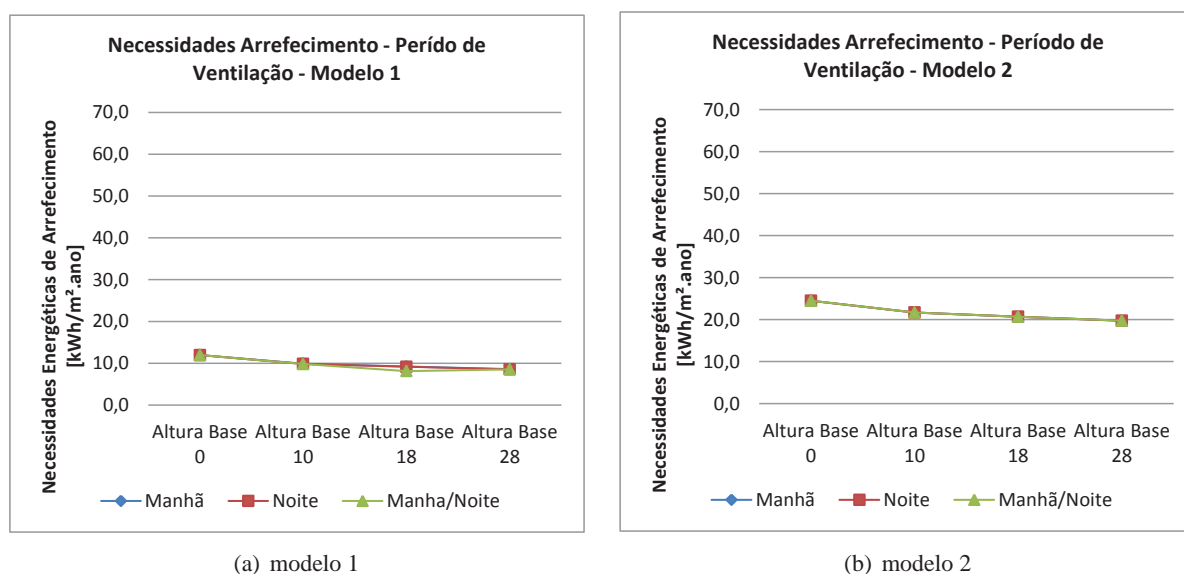


Figura 5.12: Necessidades de Arrefecimento - Período de Ventilação

No que respeita às necessidades energéticas de arrefecimento, são semelhantes em todos os períodos analisados, não existindo portanto benefícios energéticos de arrefecimento quando se altera o período de ventilação.

## 5.6 Análise modo de ventilação

O modo de ventilação pode ser bastante influente nas renovações horárias e necessidades energéticas de uma habitação pois, altera a forma como as massas de ar se deslocam no interior do edifício. No

conjunto de gráficos que se segue são apresentados os valores obtidos aquando da alteração do tipo de ventilação, em função da altura base. É apresentado também um modelo de ventilação com as renovações horárias mínimas regulamentares, influenciado parcialmente pelas condições externas, onde se limita a ventilação ao valor de 0,6 renovações horárias, de modo a proceder-se a uma comparação energética com os restantes modos.

Como se pode observar a ventilação transversal atinge valores mais elevados que os restantes modos em todos os casos, chegando a alcançar valores superiores em relação à ventilação unilateral na ordem dos 100%. Um aspecto bastante relevante é o facto da ventilação unilateral atingir apenas os valores de renovações horárias recomendados pelo RCCTE para as alturas base mais elevadas, o que pode ser benéfico a nível de conforto de ar interior para apartamentos com uma cota elevada. Em ambos os modelos a ventilação unilateral apresenta valores próximos enquanto, a ventilação transversal é superior no modelo 2 em 20%.

Relativamente à figura ??, é de salientar o facto das necessidades energéticas de aquecimento do modelo com ventilação mínima regulamentar alterarem em função da altura. Este facto deve-se à alteração que o *EnergyPlus* efectua na variável temperatura do ar exterior em relação à altura, tendo assim influência directa nos resultados obtidos. Utilizando a ventilação transversal obtêm-se necessidades energéticas superiores em 70%, para uma altura base de zero metros e em 110%, para uma altura base de vinte e oito metros, em relação à ventilação unilateral.

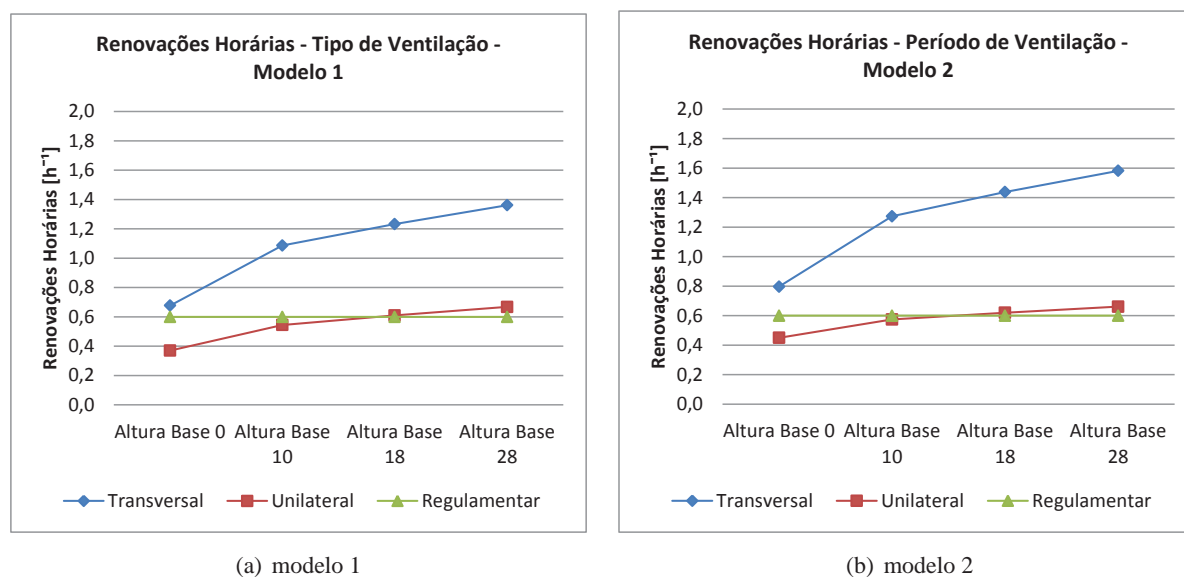


Figura 5.13: Renovações Horárias - Modo de Ventilação

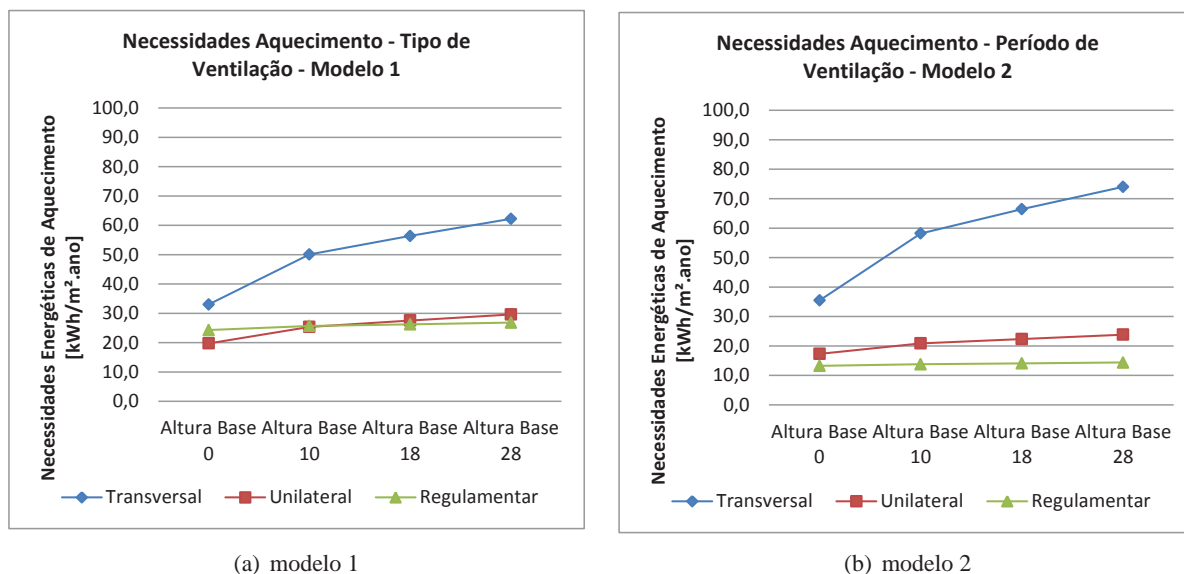


Figura 5.14: Necessidades de Aquecimento - Modo de Ventilação

A ventilação transversal apresenta valores superiores pois, permite que as massas de ar circulem mais facilmente dentro da habitação, o que provoca um arrastamento maior do ar interior e consequentemente um maior aquecimento ou arrefecimento das zonas dependendo das temperaturas das massas de ar respectivas.

Apesar das diferenças registadas a nível de necessidades energéticas de arrefecimento, os valores são muito semelhantes entre si, sendo relevante que no modelo 1 a ventilação transversal apresenta valores inferiores aos atingidos pela ventilação regulamentar e no modelo 2 tal facto já não acontecer.

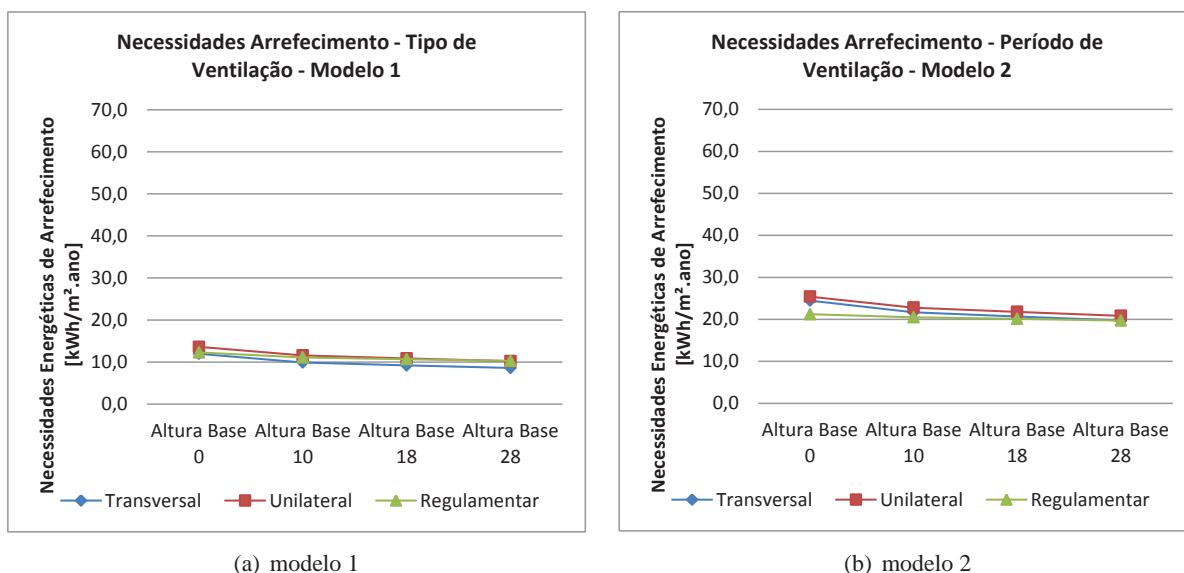


Figura 5.15: Necessidades de Arrefecimento - Modo de Ventilação

### 5.6.1 Análise tipo de ventilação por zona

Devido ao facto dos ficheiros climáticos serem diferentes, efectuou-se um conjunto de simulações para analisar os modelos com diferentes modos de ventilação inseridos nas duas zonas climáticas já analisadas anteriormente.

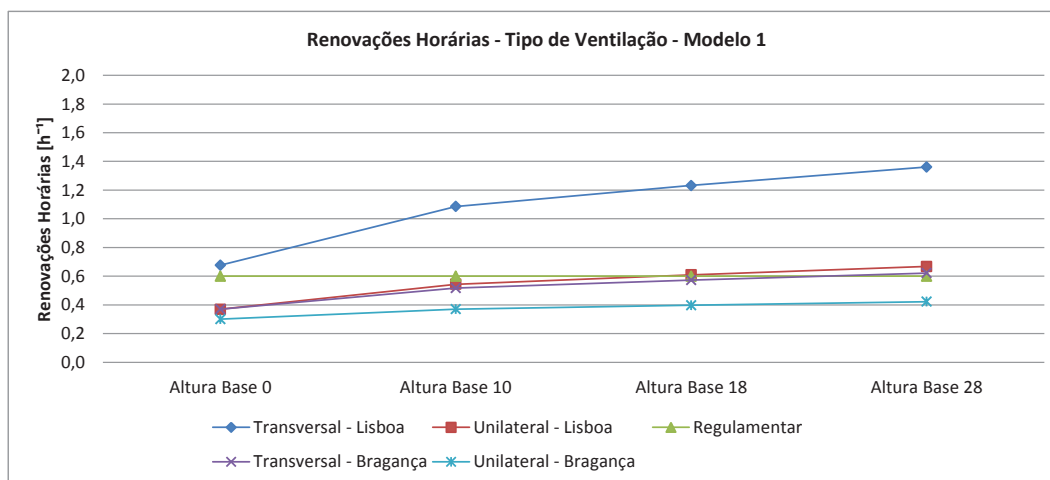


Figura 5.16: Renovações Horárias - Modo de Ventilação por Zona

Como se pode observar na figura 5.16, a diferença entre a ventilação transversal e unilateral em Lisboa é superior à diferença entre as mesmas para Bragança. A diferença entre os tipos de ventilação em Lisboa é de 80% para a altura base mais baixa e de 100% para a altura base mais elevada e de 20% e 50% para Bragança às respectivas alturas.

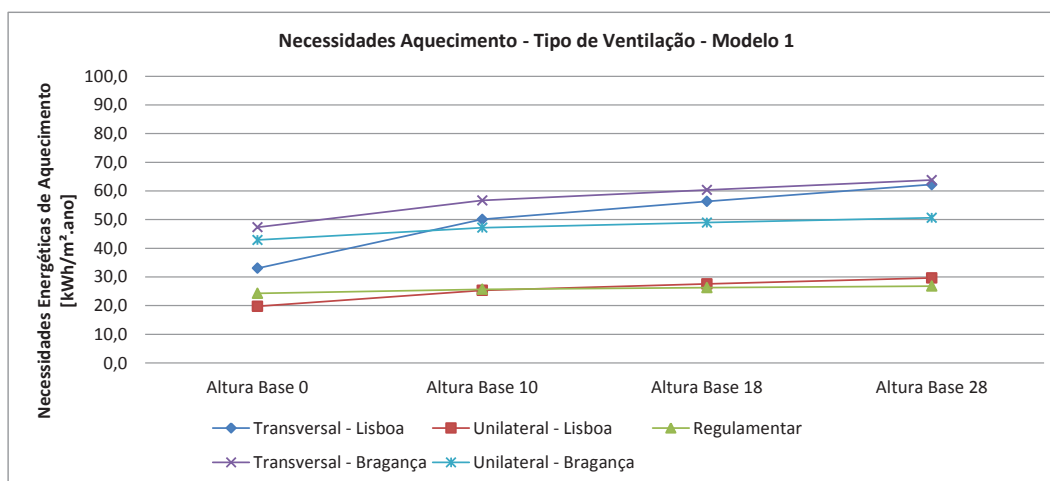


Figura 5.17: Necessidades de Aquecimento - Modo de Ventilação por Zona

Apesar de em Bragança o valor das renovações horárias ser inferior para ambos os modos de ventilação, as necessidades de aquecimento são superiores às de Lisboa, para uma altura base de zero metros, devido ao clima de Inverno mais rigoroso existente no norte do País. As necessidades apresentadas pela ventilação em Lisboa (Zona B) aumentam em função da altura base, com um declive superior às de Bragança, o que faz com que a partir da altura base de 10 metros as necessidades de aquecimento

apresentadas pela ventilação transversal em Lisboa, sejam superiores às necessidades da ventilação unilateral em Bragança. Apesar das temperaturas mais reduzidas, as necessidades de aquecimento chegam a atingir valores, para uma altura base de 28 metros, muito próximos dos obtidos para a ventilação transversal em Bragança.

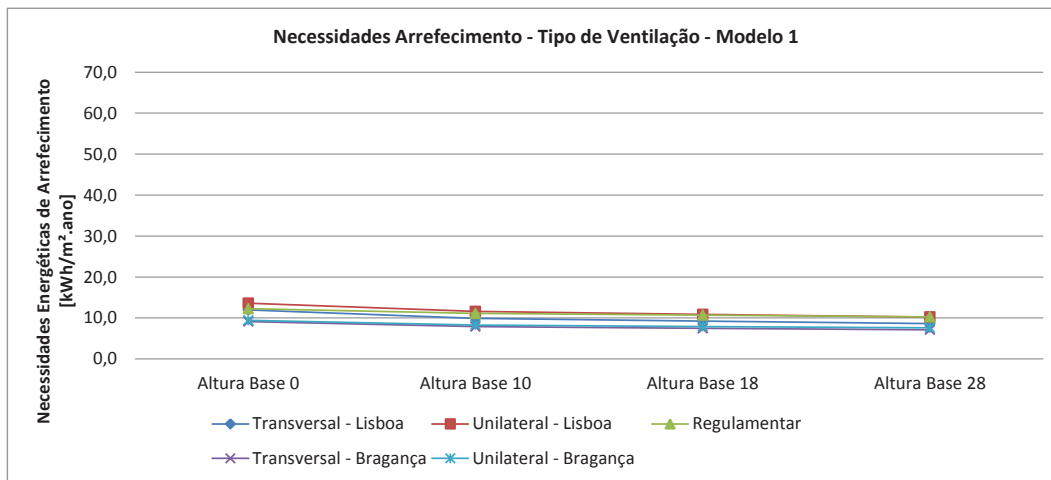


Figura 5.18: Necessidades de Arrefecimento - Modo de Ventilação por Zona

Como se pode observar na figura 5.18 necessidades energéticas de arrefecimento não apresentam grandes alterações, estando todas compreendidas entre  $7,1 kWh/m^2 \text{ ano}$  e  $12,0 kWh/m^2 \text{ ano}$ , sendo a mais elevada correspondente à ventilação transversal em Lisboa, para uma altura base zero e a restante à ventilação transversal em Bragança, para uma altura base de vinte e oito metros.

## 5.7 Influência da altura base

Ao longo das diversas análises efectuadas anteriormente, os gráficos têm vindo a desenvolver-se sempre com a mesma tendência, em relação à altura base, aumentando as renovações horárias e as necessidades de aquecimento e diminuindo as necessidades de arrefecimento. Neste tópico efectua-se uma análise ligeiramente diferente estudando qual a variável que mais altera os resultados em função da altura. As orientações escolhidas para efectuar as comparações são distintas contudo têm as mesmas propriedades, ou seja, as habitações não possuem envidraçados a Sul, sendo também as que apresentam pior desempenho a nível de renovações horárias para alturas elevadas em ambos os modelos.

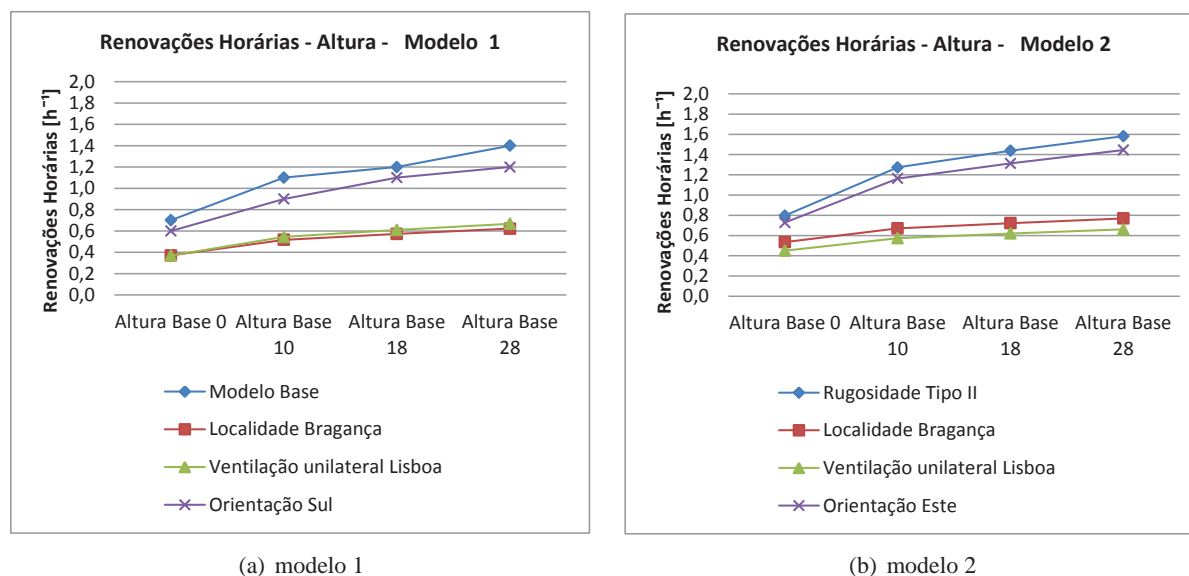


Figura 5.19: Renovações Horárias - Altura Base

Como se pode observar na figura 5.19, todas as variáveis alteram em função da altura, sendo o modelo base o que apresenta valores mais elevados em ambos os modelos de estudo. Verifica-se em todas as variáveis uma maior alteração de valores entre a altura base zero e altura base dez, onde o modelo base apresenta entre estas alturas um aumento de 60%. O mesmo edifício localizado em Bragança apresenta uma alteração de 40% e a utilização da ventilação unilateral, a par com a orientação alternativa, apresentam um aumento de 50%. Ao modificar o modelo para as restantes alturas base existe uma alteração constante de 10%. Da figura anterior conclui-se que o modo que apresenta maior alteração nas taxas de renovações horárias é a utilização da ventilação transversal no modelo base e o que apresenta menores alterações, exceptuando a mudança de horário de ventilação, é a utilização de ventilação unilateral.

Devido ao clima mais rigoroso existente em Bragança, o edifício na zona A atinge-se valores de necessidades energéticas superiores aos restantes em todas as alturas mas, é de salientar a aproximação de valores ao longo da altura que um edifício situado na zona climática B apresenta em ambos os modelos. No modelo 1 a variável parte de um valor inferior em 40% atingindo um valor, na mesma inferior, para a altura base mais elevada em 3%. Já no modelo 2 chega a ultrapassar para a altura base mais elevada em 10%. A ventilação unilateral é a que apresenta menor variação para o ficheiro climático de Lisboa, aumentando apenas as suas necessidades energéticas em 50% entre a menor e a maior altura base, enquanto a variável orientação e o modelo base apresentam alterações na ordem dos 100%.

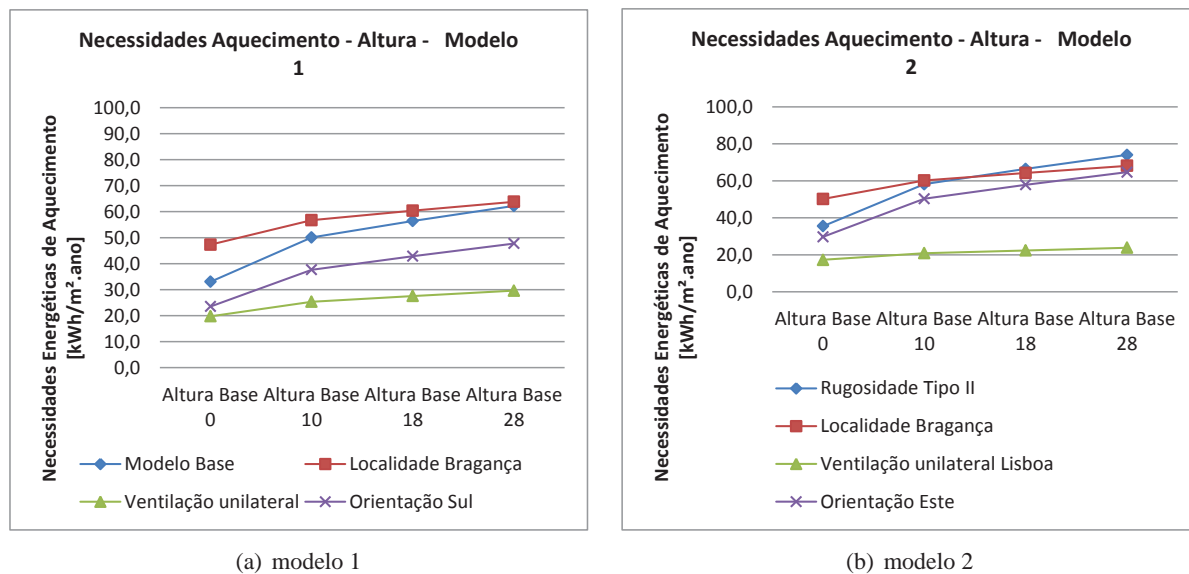


Figura 5.20: Necessidades de Aquecimento - Altura Base

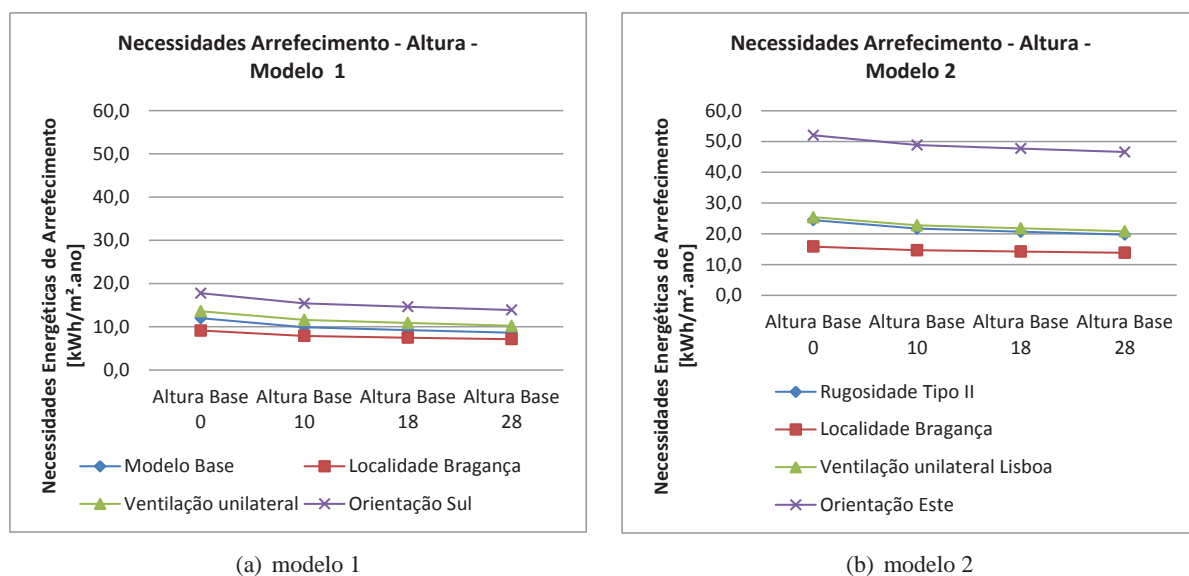


Figura 5.21: Necessidades de Arrefecimento - Altura Base

As necessidades de arrefecimento apresentam variações muito semelhantes, diminuindo para todas as variáveis entre as alturas base extremas, para valores 30% inferiores.

### 5.8 Influência dos materiais das janelas - Infiltração

As janelas são elementos importantes na qualidade de ar e conforto térmico de uma habitação, sendo através destes elementos que é feita a principal admissão de ar e, conseqüentemente, a alteração da temperatura interior com influência directa da temperatura do ar novo. Devido a deficiências

construtivas, ao tipo de material utilizado nos vãos envidraçados e à configuração dos mesmos vãos, existem sempre fluxos de ar que os atravessam os atravessam, em detrimento das análises de ventilação e térmicas pois na grande maioria dos casos estes não são tidos em conta.

As janelas são definidas no programa de cálculo através do seu material, da sua configuração e respectivos coeficientes e expoentes de fluxo. Como tal, procede-se à análise dos diferentes valores aconselhados por Liddament para diversos tipos de envidraçados. Segundo Liddament o coeficiente de fluxo pode tomar um valor mínimo de 0,50 para janelas de duas folhas com deslizamento horizontal e um valor máximo de 0,90 para uma janela de uma folha com deslizamento horizontal. O valor pré-definido pelo *EnergyPlus* é de 0,65, sendo o valor médio mais comum utilizado por Liddament de 0,66. O valor de expoente de fluxo pode tomar o valor de  $0,000101kg/m.s$  para vãos menos permeáveis e  $0,000202kg/m.s$  para os mais permeáveis, como por exemplo, os envidraçados com esquadria de madeira.

### 5.8.1 Coeficiente de fluxo

Os coeficientes de fluxo analisados correspondem às configurações de janelas apresentadas na tabela 5.3.

Tabela 5.3: Coeficientes de Fluxo Analisados

Configuração	Coeficiente de Fluxo
2 folhas deslizamento vertical	0,45
Valor pré-definido pelo <i>EnergyPlus</i>	0,65
2 folhas deslizamento horizontal	0,66
1 folha pivotante eixo central	0,7
1 folha deslizamento horizontal	0,9

As análises são efectuadas para o modelo 1, admitindo o caso base sem abertura de janelas em nenhuma ocasião, alterando apenas os valores referentes às propriedades das janelas por forma a contabilizar apenas o ar admitido por infiltração. Para uma melhor percepção das variáveis efectua-se as simulações para o caso do, terreno tipo I, altura base zero e para o caso do, terreno tipo III, altura base vinte e oito metros.



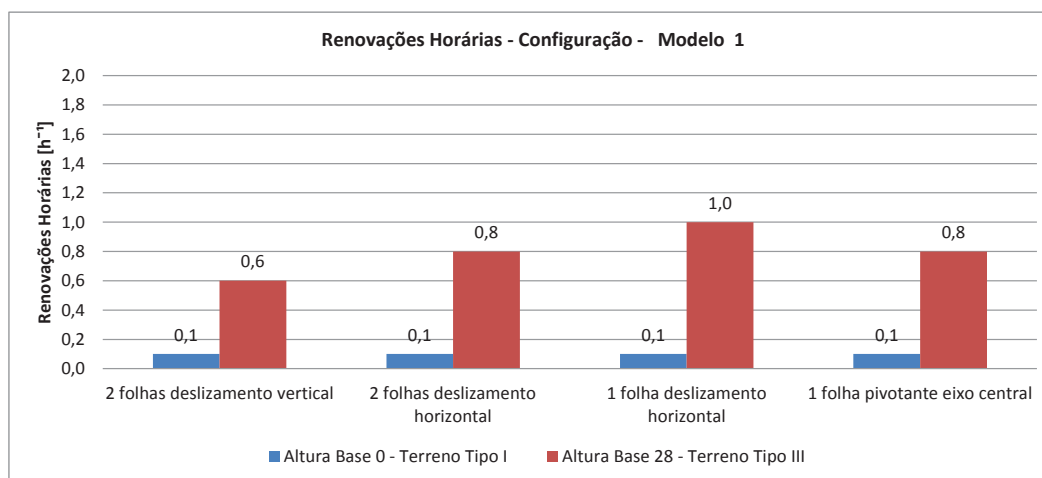


Figura 5.22: Renovações Horárias - Configuração Janelas

Como se pode observar para uma altura base de zero metros, com rugosidade aerodinâmica do terreno do tipo I, o tipo de configuração das janelas não evidencia nenhuma alteração nas taxas de renovações horárias. Por outro lado para uma altura base superior, de 28 metros, e uma rugosidade do terreno diferente, tipo III, atinge-se valores mínimos regulamentares apenas com ventilação por infiltração para todos os tipos de configuração, sendo o vão de uma folha com deslizamento horizontal o que apresenta maior valor de rph, com 1.0 renovações por hora, enquanto o vão de duas folhas de deslizamento vertical o que apresenta o menor valor com 0,6 renovações por hora.

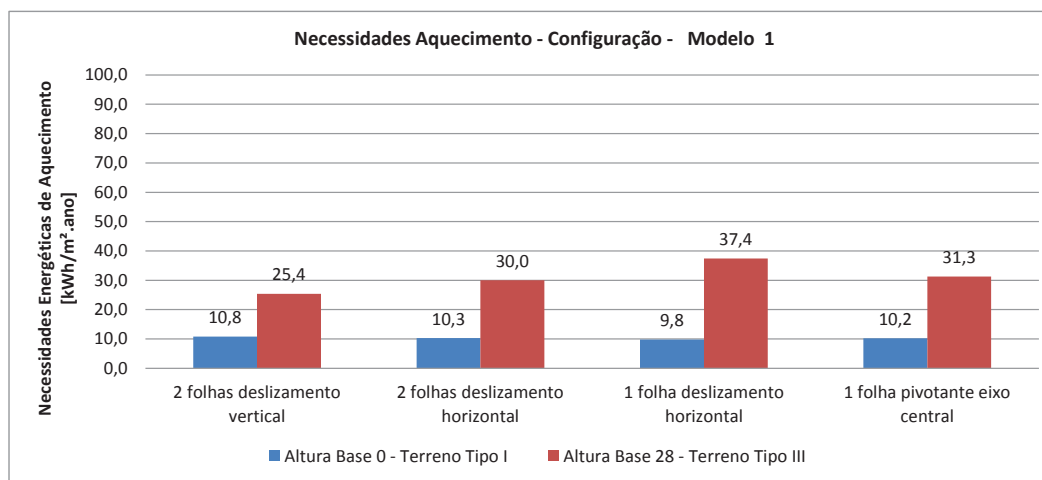


Figura 5.23: Necessidades de Aquecimento - Configuração Janelas

As necessidades energéticas permitem retirar conclusões para alturas base mais baixas pois estas, como se tem vindo a verificar ao longo das várias análises, desenvolvem-se da mesma forma que as renovações horárias. Assim depreende-se que para o caso menos exposto a tendência de resultados é semelhante ao caso onde o modelo está mais exposto, apresentando diferença de necessidades entre os valores extremos de 10% e de 53% respectivamente.

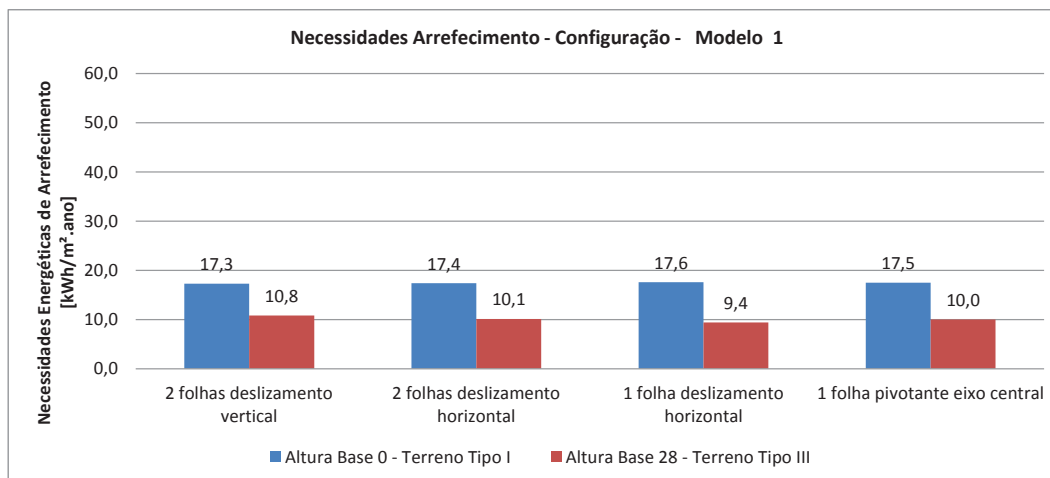


Figura 5.24: Necessidades de Arrefecimento - Configuração Janelas

Como o ar interior renova menos vezes no caso menos exposto, os resultados a nível de necessidades energéticas de arrefecimento são os esperados.

### 5.8.2 Expoente de fluxo

Os expoentes de fluxo analisados correspondem à configuração de 2 folhas com deslizamento horizontal e aos materiais apresentados na tabela 5.4. Para esta análise admite-se apenas ventilação por infiltração (sem abertura das janelas).

Tabela 5.4: Materiais da esquadria das janelas analisados

Material	Expoente de Fluxo [kg/m.s]
Madeira	0,000202
Alumínio	0,000280
PVC	0,000101

Tendo como base os valores de expoente de fluxo, propostos por Liddament, os resultados são os esperados, onde no caso menos exposto todos os materiais simulados apresentam renovações horárias com valor nulo. Já para o caso mais exposto nota-se uma grande diferença entre os materiais, sendo o alumínio o que apresenta maior admissão de ar, com 0,3 e o PVC a menor, com 0,1 renovações por hora.

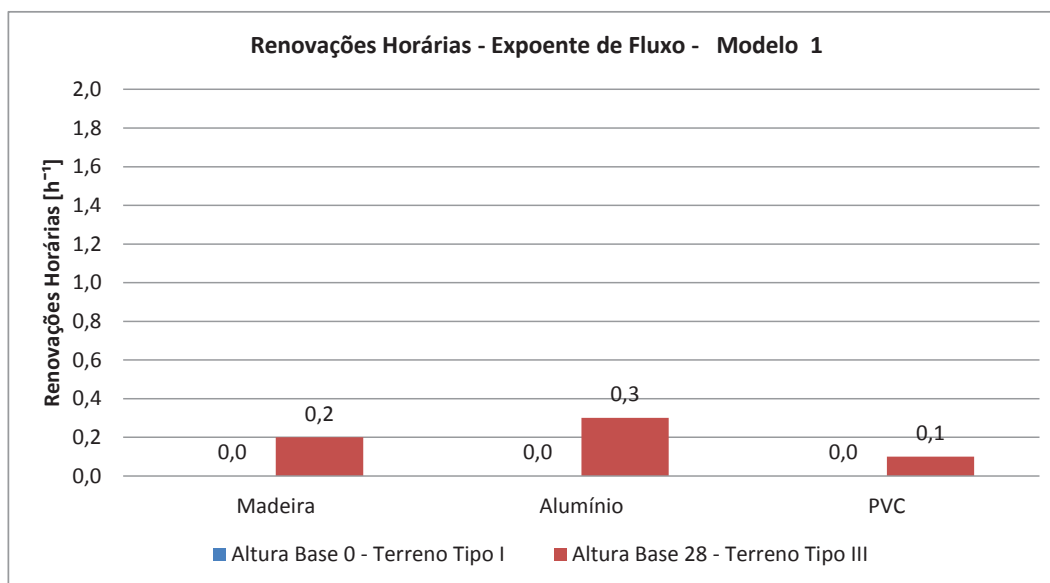


Figura 5.25: Renovações Horárias - Expoentes de Fluxo de Materiais

As necessidades energéticas de aquecimento são baixas pois, o facto ventilação ser reduzida e o fluxo de massas de ar admitido no interior do edifício ser praticamente nulo, a cada espaço de tempo origina a que o edifício mantenha quase sempre a temperatura interior dentro da zona confortável, devido quase exclusivamente, aos ganhos internos e pela envolvente exterior.

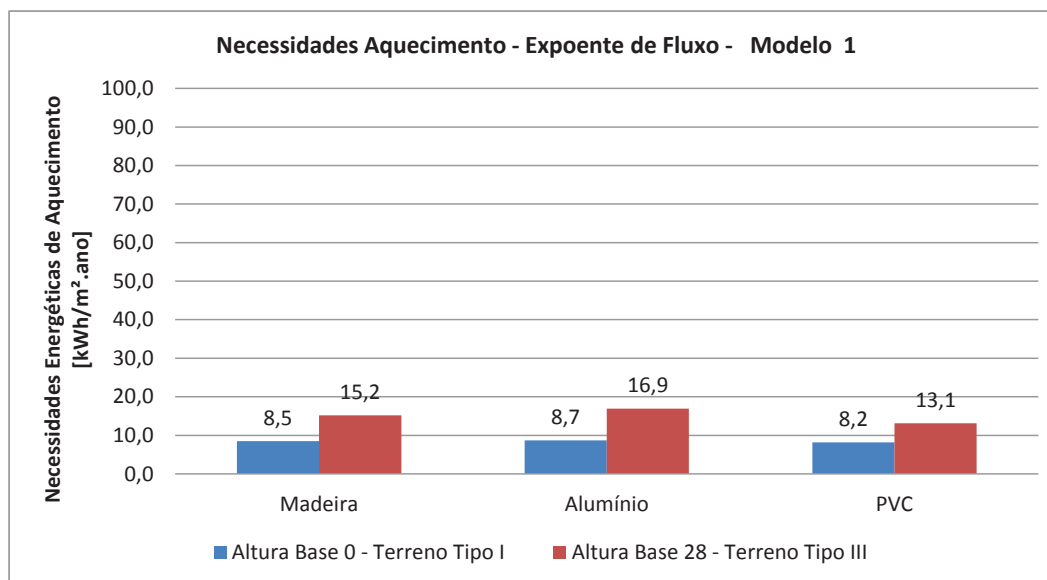


Figura 5.26: Necessidades de Aquecimento - Expoentes de Fluxo de Materiais

Para este caso, onde não se efectua abertura de janelas, as necessidades de arrefecimento tomam valores mais significativos no conforto térmico interior do edifício, chegando para o caso menos exposto, a apresentar valores superiores em 200% em relação às necessidades de aquecimento.

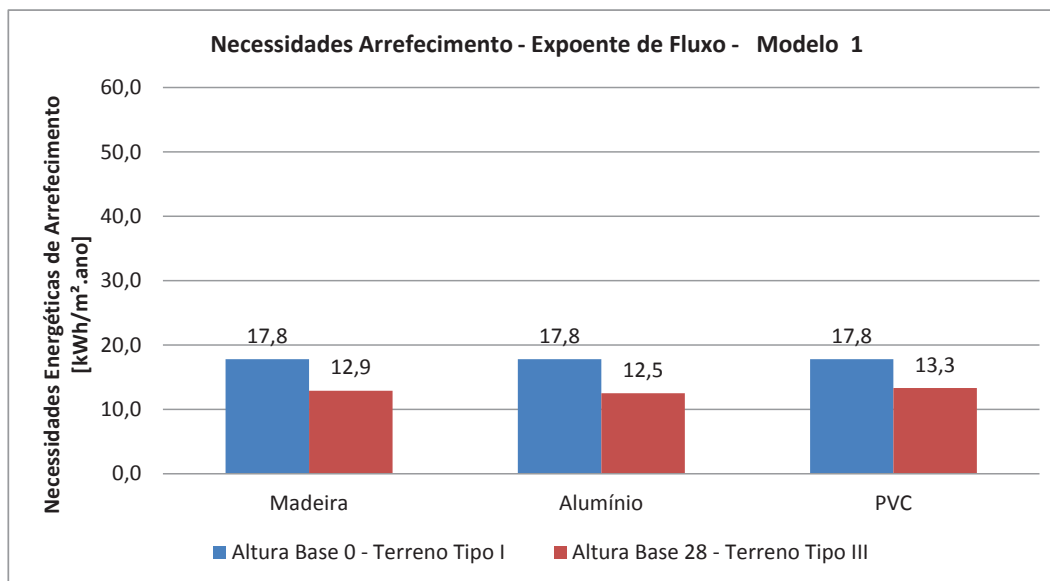


Figura 5.27: Necessidades de Arrefecimento - Expoentes de Fluxo de Materiais

O estudo destes parâmetros é o exemplo prático que, é necessário ter em conta um conjunto largo de parâmetros, tendo em conta as implicações demonstradas.

### 5.8.3 Comparação com ventilação induzida

Com base nos resultados obtidos na secção 5.8.1 efectua-se uma comparação dos valores referentes ao modelo mais exposto com os valores obtidos através da ventilação induzida pelo utilizador. A ventilação induzida é obtida da mesma forma que a ventilação mínima de referência limitando o programa a um determinado valor de renovações horárias. À semelhança dos valores obtidos no tópico referido, foram simulados modelos com ventilação induzida para os valores de 0,6, 0,8 e 1,0 renovações horárias para uma comparação a nível energético.

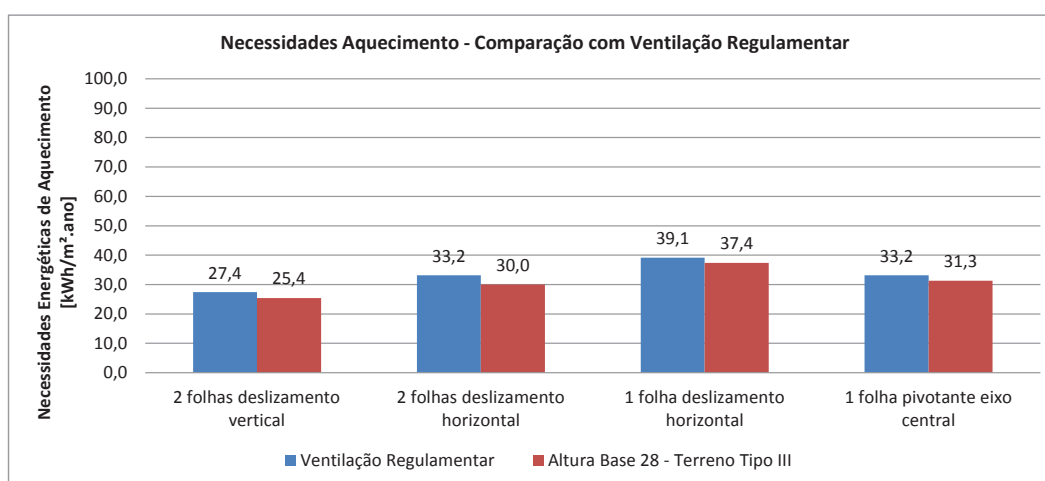


Figura 5.28: Necessidades de Aquecimento - Comparação com Ventilação Induzida

As necessidades apresentadas pelas configurações de uma folha são superiores às obtidas pela configuração de duas folhas em ambos os modos de ventilação. A ventilação induzida apresenta valores superiores aos da ventilação natural na ordem dos 10% para a configuração de duas folhas e de 5% para a configuração de uma folha.

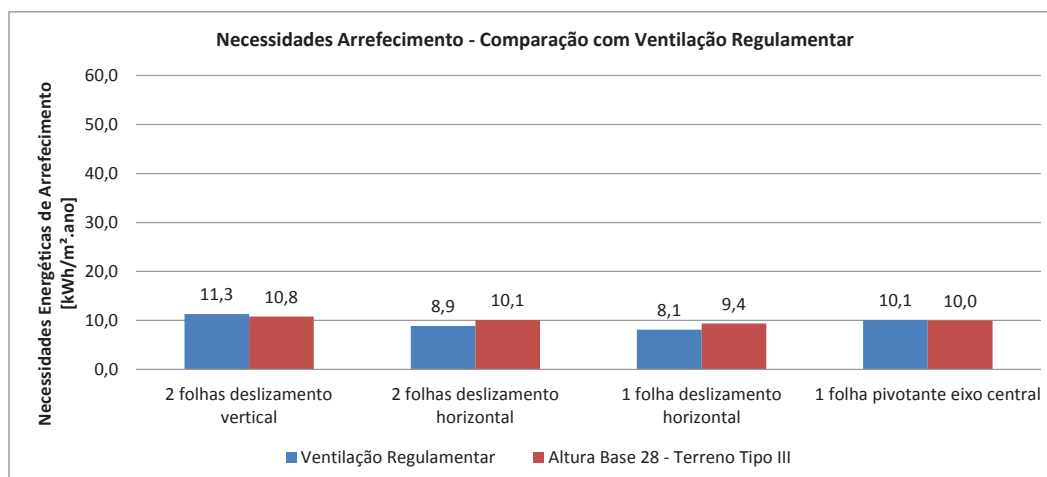


Figura 5.29: Necessidades de Arrefecimento - Comparação com Ventilação Induzida

As necessidades de arrefecimento obtidas pelas janelas que movimentam as suas folhas na vertical apresentam valores superiores aos obtidos através da ventilação natural sendo que para o elemento de duas folhas o valor é 5% superior e 1% para o elemento com apenas uma folha. Para os restantes elementos simulados, com deslizamento horizontal, as necessidades apresentadas pela ventilação natural são superiores às obtidas pela ventilação induzida em 15% para ambas configurações.

## 5.9 Influência classes de exposição

Nesta secção apresenta-se um conjunto de resultados obtidos através do modelo 2 aquando da alteração das configurações das janelas para as diferentes classes de exposição ao vento e modos de ventilação.

Efectuando a leitura do conjunto de figuras 5.30 conclui-se que, para a classe de exposição ao vento I e II, não existe alterações nas renovações horárias quando se altera o tipo de janela. Para a classe de exposição I o período de ventilação de 30 minutos não é suficiente para que se atinja as renovações horárias médias anuais de taxas de renovação do ar aconselhados pelo RCCTE, já para a classe de exposição II o modo de ventilação transversal é o único que atinge os valores recomendados. Também é de notar que existe um aumento de 100% nas renovações horárias no modo de ventilação por infiltração quando se altera da classe de exposição I para a classe de exposição II.

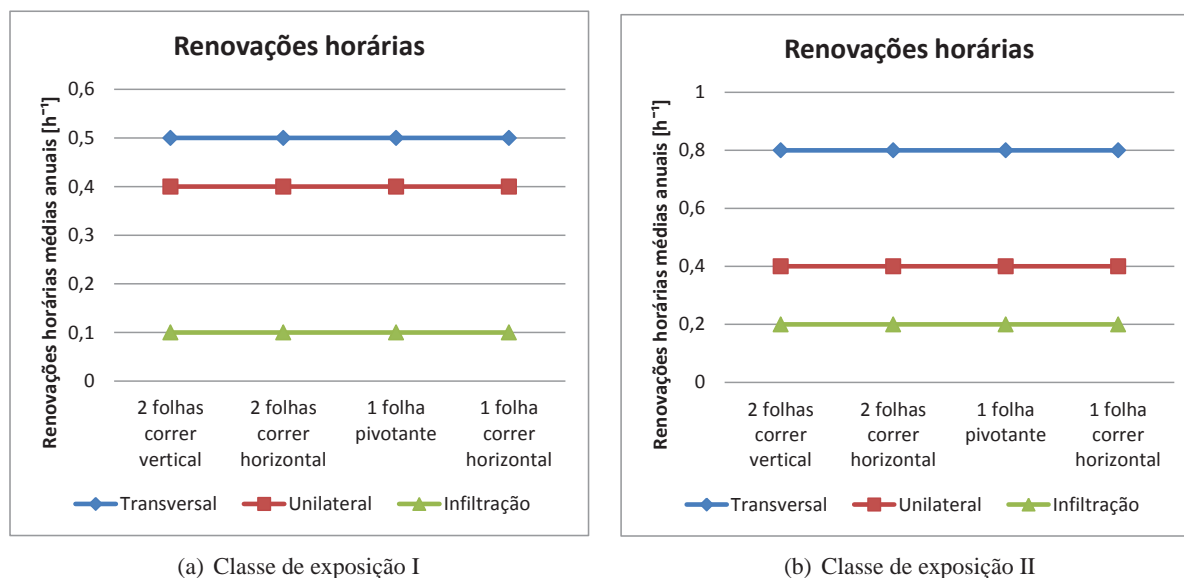


Figura 5.30: Renovações horárias - Classe de exposição I e II

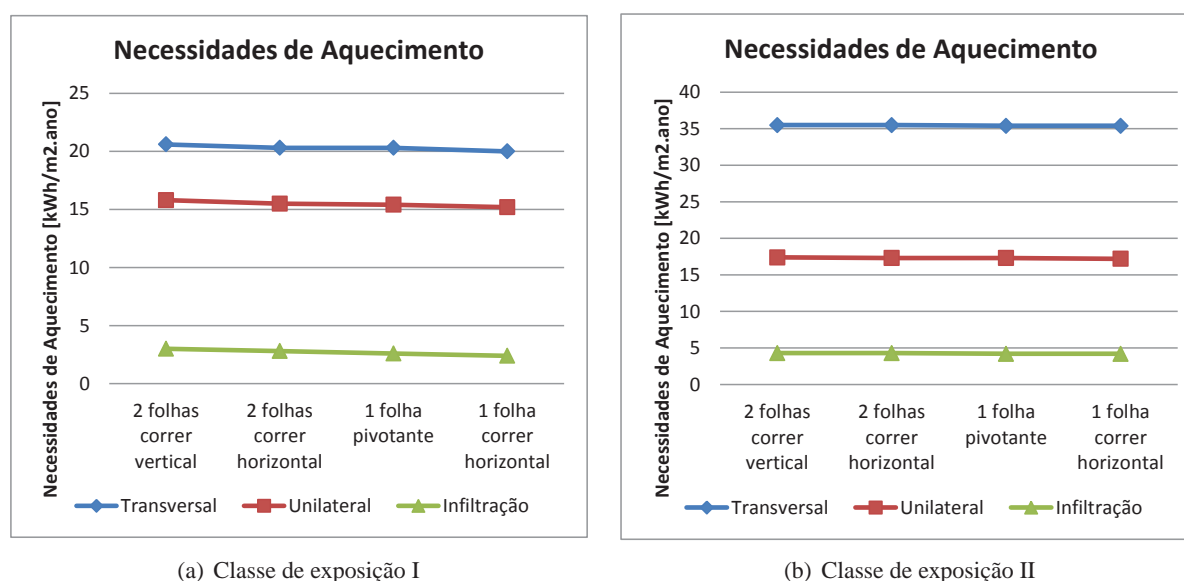
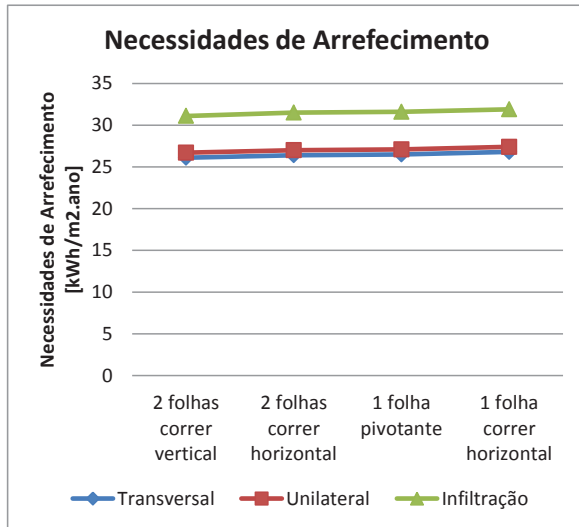
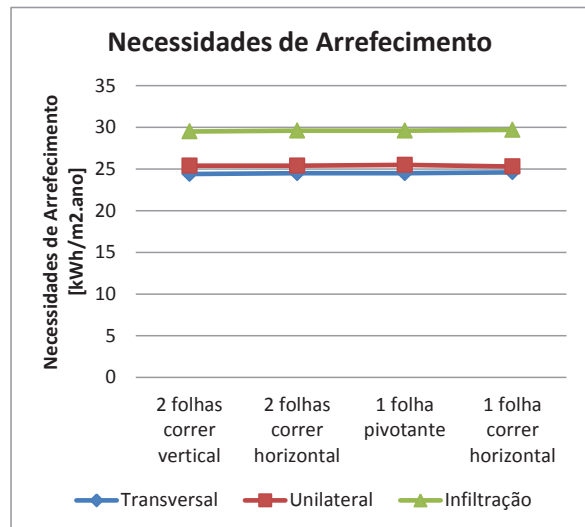


Figura 5.31: Necessidades Energéticas de Aquecimento - Classe de exposição I e II

Apesar das renovações horárias do modo de ventilação unilateral serem constantes para as duas classes de exposição acima referidas pode-se observar nas figuras 5.31 e 5.32 que as necessidades da classe de exposição II apresentam valores ligeiramente superiores para todas as configurações das janelas. Como já era espectável a classe de exposição ao vento II apresenta valores de necessidades de aquecimento superiores e necessidades de arrefecimento inferiores que a classe de exposição I.



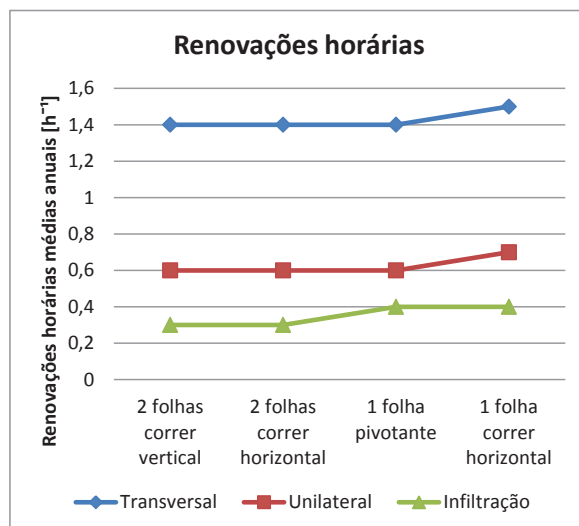
(a) Classe de exposição I



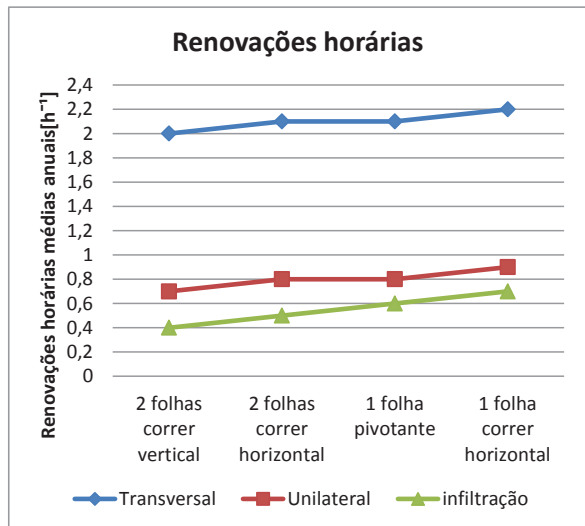
(b) Classe de exposição II

Figura 5.32: Necessidades Energéticas de Arrefecimento - Classe de exposição I e II

Através do conjunto de imagens 5.33 pode concluir-se, que à semelhança dos valores obtidos para as classes de exposição I e II, as configurações de janelas com duas folhas e com uma folha pivotante não apresentam diferenças nas taxas de renovação horária e que a configuração com uma folha de correr horizontal apresenta, para a classe de exposição III, um ligeiro aumento de 0,1 renovações médias anuais por hora. Para esta classe de exposição, o modo de ventilação transversal apresenta valores superiores em mais do dobro do valor recomendado e o modo de ventilação unilateral apresenta valores iguais aos recomendados.



(a) Classe de exposição III



(b) Classe de exposição IV

Figura 5.33: Renovações horárias - Classe de exposição III e IV

Na classe de exposição IV as janelas com configuração de uma folha (pivotante e horizontal) atingem, no modelo apenas ventilado por infiltração, as renovações horárias medias anuais recomendadas pelo RCCTE chegando o modelo com janelas de uma folha de correr horizontal a apresentar valores ligeiramente superiores. O modo de ventilação unilateral apresenta valores compreendidos entre as 0,7 e 0,9 renovações por hora enquanto o modo de ventilação transversal apresenta valores acima das duas renovações horárias.

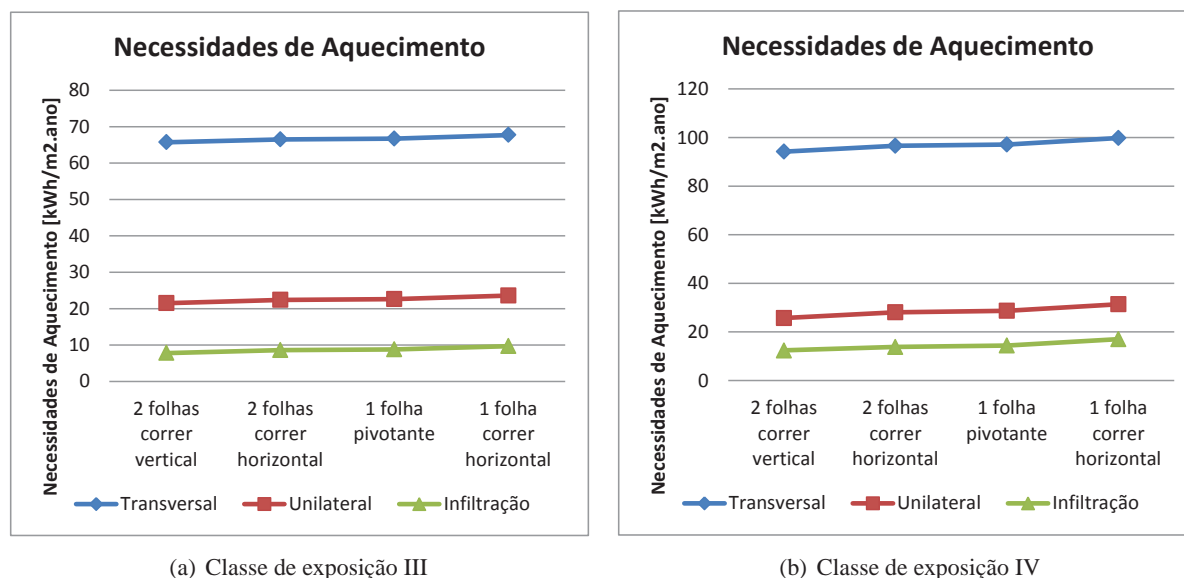
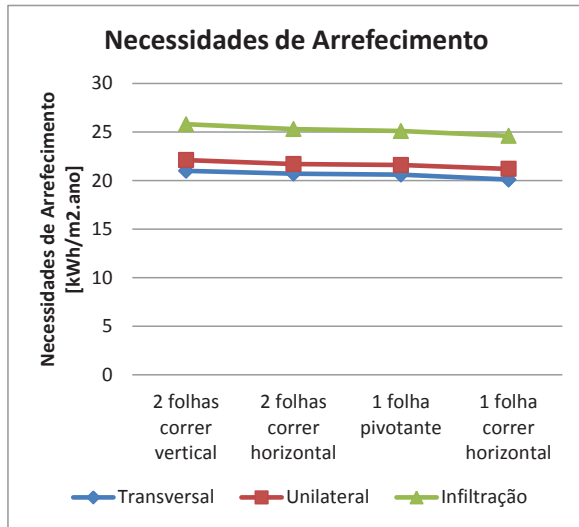


Figura 5.34: Necessidades Energéticas de Aquecimento - Classe de exposição III e IV

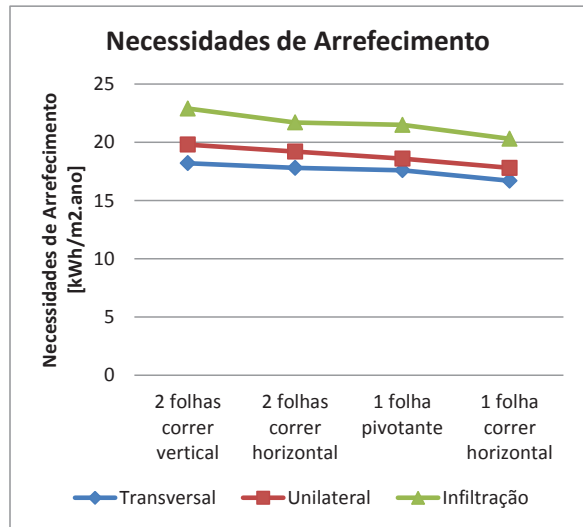
Através da leitura das figuras 5.31 e 5.34 é de notar que para as classes de exposição I e II as configurações das janelas de duas folhas apresentam maiores necessidades energéticas de aquecimento e menores necessidades de arrefecimento e para as classes de exposição III e IV tomam os valores menores nas necessidades de aquecimento e maiores nas de aquecimento. Apesar dos valores acima referidos não apresentarem diferenças significativas para este modelo conclui-se que dependendo da classe de exposição a configuração das janelas pode desempenhar um papel cooperativo na diminuição das necessidades energéticas.

Observando as figuras referidas no paragrafo anterior é possível concluir que quando aplicado o modo de ventilação transversal ao modelo este apresenta necessidades energéticas para a classe de exposição IV cerca de três vezes superiores às apresentadas na classe II (quase cinco vezes superior às necessidades apresentadas na classe de exposição I mas esta não apresenta valores de renovação horária que garantam a salubridade do ar interior). Por outro lado o modo de ventilação unilateral apresenta valores semelhantes para todas as classes de exposição apesar de apresentar valores de taxas de renovações horárias distintos.





(a) Classe de exposição III



(b) Classe de exposição IV

Figura 5.35: Necessidades Energéticas de Arrefecimento - Classe de exposição III e IV



## Capítulo 6

# Conclusões e desenvolvimentos futuros

O presente trabalho centrou-se na influência de variáveis associadas à ventilação natural em edifícios residenciais representados por modelos computacionais que visam representar dois apartamentos com áreas e configuração distintas e foi simulado com *EnergyPlus*. A utilização de dois modelos surge da necessidade de verificar se as variações provocadas nos resultados aquando da alteração das variáveis causam os mesmos impactes. Para proceder ao estudo destas variáveis efectuaram-se simulações alterando as características do local onde o edifício é implementado (Ficheiro climático, orientação, altura base, rugosidade do terreno), características dependentes da utilização do apartamento (período e duração da ventilação) e características associadas a escolhas construtivas (material e configuração das janelas).

De acordo com os resultados obtidos pode-se concluir que ao alterar os parâmetros associados à ventilação natural verifica-se que para todas as simulações os resultados em ambos os modelos apresentam a mesma tendência. O modelo 2 apresenta maiores necessidades energéticas em relação ao modelo 1, este facto deve-se aos ganhos internos utilizados em ambos os modelos serem constantes e os volumes das áreas interiores do modelo 2 serem superiores. Quando modificada a orientação do edifício este apresenta valores distintos sendo promovida a renovação do ar interior quando as fachadas que têm mais área de envidraçados estão orientadas a Sul apresentando valores superiores em 20% em relação a outras orientações.

A rugosidade do terreno é um factor que, apesar de não fazer parte do edifício, altera significativamente o desempenho energético de um edifício. Alterando apenas este factor externo consegue-se atingir valores com diferenças de 20% tanto positivas como negativas em relação ao modelo base. Logo no estudo de um edifício é relevante ter em conta o local onde está implementado o edifício e as construções circundantes.

Os factores mais condicionantes são a temperatura exterior e a velocidade do vento pois são estes que apresentam a maior alteração no estudo da ventilação natural, como se pode observar ao longo do trabalho os gráficos onde apresentam-se as renovações horárias e as necessidades energéticas aumentam significativamente em função da altura, assim como as necessidades energéticas de aquecimento aumentam quando se utiliza o ficheiro climático de Bragança.

As estratégias de ventilação estudadas no presente trabalho permitem concluir que para atingir um bom desempenho térmico, o edifício pode não estar todo sujeito às mesmas estratégias de ventilação, com as simulações dos modos de ventilação verifica-se que a ventilação transversal apresentam valores de

renovações horárias superiores em relação à ventilação unilateral e que o modo de ventilação unilateral não atinge os valores mínimos recomendados pelas normas para todas as classes de exposição ao vento assim sendo é benéfico a utilização da ventilação transversal em locais com classe de exposição I e II e a ventilação unilateral para locais de classe de exposição III e IV para garantir a qualidade do ar interior. Por outro lado também se conclui que o modo de ventilação unilateral é o mais equilibrado energeticamente não apresentando alteração significativas quando se altera a classe de exposição.

Tendo em conta os diferentes períodos do dia admitidos para efectuar a ventilação só a ventilação que ocorre no período nocturno apresenta uma redução de 10% nas necessidades energéticas de arrefecimento os restantes períodos mantêm valores iguais assim como as necessidades de arrefecimento em todos os casos.

Em suma pode concluir-se que não existe uma estratégia de ventilação que seja adequada para todos os edifícios mas sim uma para cada fracção autónoma e que existe a possibilidade de melhorar o desempenho da habitação conjugando diversos factores.

Tendo em conta o tempo de análise do projecto e o custo inerente à experimentação de todas as situações possíveis, uma ferramenta computacional pode ser útil no estudo da ventilação natural e conforto térmico de um edifício pois, permite alterar facilmente as características do edifício obtendo rapidamente resultados facilitando as decisões fulcrais num projecto.

Este trabalho pode servir no futuro como base para o desenvolvimento de estudos sobre ventilação natural nomeadamente nos seguintes tópicos:

- Estudo da ventilação natural com auxílio a ficheiros climáticos referentes a anos específicos através de monitorização própria e comparação com desempenho real;
- Efectuar simulações do edifício tendo em conta obstáculos constantes na zona de implantação.
- Utilização de outro método de cálculo de coeficientes de pressão;
- Realização de uma comparação económica com outros meios de ventilação;
- Estudo para o desenvolvimento de um dispositivo que permita efectuar a ventilação natural sem auxílio dos ocupantes;
- Estudo das condições ideais de ventilação para cada habitação em cada zona climática.

# Bibliografia

- [1] [www.inmetro.gov.br/consumidor/produtos/qualidadedoAr.asp](http://www.inmetro.gov.br/consumidor/produtos/qualidadedoAr.asp), 3 2011.
- [2] [www.euro.who.int/en/what-we-do/health-topics/environment-and-health/air-quality](http://www.euro.who.int/en/what-we-do/health-topics/environment-and-health/air-quality), 05 2011.
- [3] <http://en.wikibooks.org/wiki/LaTeX>, 3 2011.
- [4] [www.euro.who.int/en/what-we-do/health-topics/environment-and-health/air-quality](http://www.euro.who.int/en/what-we-do/health-topics/environment-and-health/air-quality), 3 2011.
- [5] [http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/cfm/weather\\_data3.cfm/region=6\\_europe\\_wmo\\_region\\_6/country=PRT/cname=Portugal](http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/cfm/weather_data3.cfm/region=6_europe_wmo_region_6/country=PRT/cname=Portugal), 3 2011.
- [6] Refrigerating American Society of Heating, American Society of Heating Refrigerating Air Conditioning Engineers, Incorporated, and Air-Conditioning Engineers. *Ashrae Handbook*. American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers, Incorporated, 1997.
- [7] John D Anderson. *Fundamentals of Aerodynamics*, volume A. McGraw Hill, 4 edition, 2007.
- [8] Afonso C. *Uma metodologia para a caracterização de fluxos de ar multizona em edifícios*. 1989.
- [9] Aelenei D. *RCCTE light*. FCT-UNL, 2009.
- [10] Good J. Frisque A. Phillips D. *Third National Conference of IBPSA*. 2008.
- [11] Diário da República. Decreto-lei n.º 80/2006 de 4 de abril. regulamento das características de comportamento térmico de edifícios (rccte)., 2006. I Série-A n.º. 67 2468-2413.
- [12] Walton G.N. Stuart D.W. *CONTAM User Guide and Program Documentation*. NIST - National Institute of Standards and Technology, Boulder - Colorado.
- [13] Toledo E. *Ventilação natural dos edifícios*. LNEC-Lisboa, 1967.
- [14] Santamouris M. Allard F. *Natural Ventilation in Buildings - a design handbook*. James & James, 1998.
- [15] Evola V. Popov G. Computational analysis of wind driven natural ventilation in buildings. *Energy and Buildings*, v.38:491–501, 2006.
- [16] Awbi H.B. *Ventilation. Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Pergamon, 2 edition, 1998.

- [17] IPQ. *Norma Portuguesa de Ventilação e evacuação dos produtos da combustão dos locais com aparelhos a gás - Parte 1*. 2002.
- [18] Santos J. *Avaliação experimental dos níveis de qualidade do ar interior em quartos de dormir*. 2008.
- [19] Saraiva J. *Boundary Layer Above Urban Areas, Contribuição para o Projecto Pascool (EU)*, 1994.
- [20] Viegas J. *Contribuição da ventilação natural para a qualidade do ambiente interior em edifícios*. LNEC-Lisboa, 2000.
- [21] Zhai Z. Chen Q. Haves P. Klems J.H. On approaches to couple energy simulation and computational fluid dynamics programs. *Energy and Buildings*, v.37:857–864, 2002.
- [22] LNEC. *Eurocódigo 1 - Acção em estruturas Parte 1-4: Acções gerais Acções do vento*. LNEC, 2010.
- [23] Sharpe M. Indoor air pollution and health. *Journal of Environmental Monitoring*, v.6:45–49, 2004.
- [24] Liddament M.W. *Air Infiltration Calculation Techniques - An Applications Guide*. 1986.
- [25] Liddament M.W. *A Guide to Energy Efficient Ventilation*. 1996.
- [26] Walton George N. *AIRNET - A computer program for building airflow network modeling*. Boulder - Colorado, 2002.
- [27] Stavrakakis G.M. Koukou M.K. Vrachopoulos M.G. Markatos N.C. Natural cross-ventilation in buildings: Building-scale experiments, numerical simulation and thermal comfort evaluation. *Energy and Buildings*, v.40:1666–1681, 2008.
- [28] The Board of Trustees of the University of Illinois and the Regents of the University of California through the Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory. *EnergyPlus Engineering Reference*. US Department of Energy, Washington DC, 2010.
- [29] Paul M. Taylor P. A comparison of occupant comfort and satisfaction between a green building and a conventional building. *Building and Environment*, v.43:1858–1870, 2008.
- [30] Wang L. Chen Q. Applications of a coupled multizone and cfd model to calculate airflow and contaminant dispersion in built environment for emergency management. *HVAC&R Research*, 2008.
- [31] Tan G. Glicksman R. Application of integrating multi-zone model with cfd simulation to natural ventilation prediction. *Energy and Buildings*, v.37:1049–1057, 2005.
- [32] Patankar S.V. *Numerical Heat Transfer and Heat Flow*. Mcgraw-Hill, 1980.