



FCTUC DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
FACULDADE DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE COIMBRA

Requisitos de casas passivas para o clima português: Estudo comparativo entre a regulamentação nacional e os requisitos *Passive House*

Dissertação apresentada para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil na Especialidade de Construções

Autor

Inês Miguel Macedo Abrantes da Silva Alves

Orientador

Prof. Doutor Nuno Albino Vieira Simões

Esta dissertação é da exclusiva responsabilidade do seu autor, não tendo sofrido correcções após a defesa em provas públicas. O Departamento de Engenharia Civil da FCTUC declina qualquer responsabilidade pelo uso da informação apresentada

Coimbra, julho, 2014

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar gostaria de agradecer ao Professor Nuno Simões, por todo o apoio, disponibilidade e orientação prestados ao longo deste trabalho.

Gostaria, também, de agradecer à *Passive House* e ao projecto “Energia e Mobilidade para Regiões Sustentáveis - EMSURE – Projeto (CENTRO-07-0224-FEDER-002004)” pela informação disponibilizada.

Aos meus pais, por me terem inculcido os valores que fizeram de mim a pessoa que hoje sou, por me permitirem o acesso a este nível de ensino e sobretudo pelo apoio, compreensão, carinho e confiança demonstrados ao longo de toda a minha vida.

A toda a minha família que sempre depositou em mim a confiança que me serviu de apoio para que pudesse chegar até aqui.

Aos meus amigos, por todo o apoio, carinho e entreaajuda demonstrados, não só nesta fase final da minha vida académica como em muitos períodos da minha vida.

A todos aqueles que de forma direta ou indireta me permitiram chegar aqui e que de alguma forma me ajudaram, o meu muito obrigado!

RESUMO

Hoje em dia, a preocupação ambiental está presente em tudo o que nos rodeia. O crescente consumo de energia a nível global conduz a um maior consumo de recursos e a todos os problemas ambientais e económicos que são inerentes à produção de energia. Com a implementação duma forma de pensar mais verde, e uma vez que o parque habitacional representa uma grande fatia da energia consumida é importante procurar uma forma de reduzir este consumo.

Com este trabalho pretende-se comparar duas metodologias: *Passive House Planning Package* (PHPP) e Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Habitação (REH), avaliando a importância de algumas variáveis, nomeadamente, a eficiência do sistema de ventilação mecânica com recuperação de calor, as pontes térmicas, a espessura do isolamento, a área dos vãos envidraçados, a exposição ao vento, a localização do edifício, as condições de fronteira e o sombreamento. Para esta avaliação foi selecionado um edifício minimalista, onde a área é representativa e o aspeto arquitetónico não influencie a avaliação das variáveis e, posteriormente, simulado utilizando o programa em Excel de ambas as metodologias.

ABSTRACT

Nowadays, environmental concern is present in everything that surrounds us. The increasing power consumption at the global level leads to a higher consumption of resources and all the environmental and economic problems that are inherent in the production of energy. With the implementation of a greener way of thinking, and once the housing stock represents a large share of the energy consumed is important to look for a way to reduce this consumption.

With this work we intend to compare two methods: Passive House Planning Package (PHPP) and Regulation Energy Performance of Buildings Housing (REH), assessing the importance of some variables, namely, the efficiency of the mechanical ventilation system with heat recovery, thermal bridges, insulation thickness, the area of the glazed areas, exposure to wind, the location of the building, the boundary conditions and the shading. For this evaluation, a minimal building where the area is representative of the architectural appearance and does not influence the evaluation of the variables, and subsequently simulated using the Excel program in both methods is selected.

ÍNDICE

RESUMO	i
ABSTRACT	ii
ÍNDICE	iii
ÍNDICE DE FIGURAS	iv
ÍNDICE DE QUADROS	vii
ABREVIATURAS	viii
1. INTRODUÇÃO	1
2. A EFICIÊNCIA ENERGÉTICA	3
2.1. A Eficiência Energética em Edifícios	3
2.2. Viabilidade Económica de Edifícios	3
2.3. Enquadramento Legislativo em Portugal	4
3. CONCEITO <i>PASSIVE HOUSE</i>	6
3.1. Qual é o significado de ser <i>Passive House</i>	6
3.2. Origem e Desenvolvimento do Conceito	6
3.3. Projetos de Implementação do Conceito	8
3.3.1. CEPHEUS	8
3.3.2. Projeto Orientado para Utilizadores de Casas Passivas	10
3.3.3. PEP	11
3.3.4. <i>PASSIVE-ON</i>	11
3.4. Os Princípios Fundamentais do Conceito <i>Passive House</i>	11
3.5. <i>Passive House versus</i> Solar Passivo	11
3.6. <i>Passive House</i> como Padrão para NZEB	13
4. CERTIFICAÇÃO	15
4.1. SISTEMA DE CERTIFICAÇÃO ENERGÉTICA	15
4.2. CERTIFICAÇÃO PH	15
5. REQUISITOS TÉCNICOS PARA EDIFÍCIOS PH	17
5.1. Especificidades das Soluções Construtivas	18
5.1.1. Isolamento Térmico da Envolvente Opaca	18
5.1.2. ENVIDRAÇADOS	19
5.2. Especificidades da Estanquidade	21
5.2.1. Teste Blower Door	22
5.2.2. Análise Experimental de Testes de Pressurização e Despressurização	22
5.3. Ventilação	29

5.3.1.	A Ventilação e a Saúde.....	29
5.3.2.	Taxas de Ventilação.....	30
5.3.3.	Estudo de Simulação de Taxas Mínimas de Ventilação.....	31
5.3.4.	Sistemas de Ventilação com Recuperação de Calor.....	32
5.4.	AQUECIMENTO DO AR.....	33
5.5.	Superaquecimento.....	35
6.	MODELOS DE SIMULAÇÃO ENERGÉTICA.....	38
7.	METODOLOGIAS DE CÁLCULO DO BALANÇO ENERGÉTICO.....	39
7.1.	PHPP.....	39
7.1.1.	Cálculo das Necessidades de Energia para o Aquecimento.....	39
7.2.	REH.....	42
7.2.1.	CÁLCULO DAS NECESSIDADES DE ENERGIA PARA O AQUECIMENTO.....	43
8.	AVALIAÇÃO DAS VARIÁVEIS.....	48
8.1.	DESCRIÇÃO DO EDIFÍCIO EM ESTUDO.....	48
8.2.	AVALIAÇÃO DO EDIFÍCIO DE REFERÊNCIA DO REH.....	49
8.3.	Avaliação da Eficiência do Sistema de Ventilação Mecânica com Recuperação de Calor 50	
8.4.	Avaliação da Influência das Pontes Térmicas Lineares nos Resultados.....	52
8.5.	Avaliação da Influência da Espessura do Isolamento nos Resultados.....	53
8.6.	Avaliação da Influência da Área dos Vãos Envidraçados nos Resultados.....	55
8.7.	Avaliação da Influência das Condições de Fronteira nos Resultados.....	59
8.8.	Avaliação da Influência do Sombreamento nos Resultados.....	62
8.9.	Avaliação da Influência da Exposição ao Vento nos Resultados.....	63
8.10.	Avaliação da influência dos dados climáticos em função da Localização.....	65
9.	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	67
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	68

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 3.1 – Mapa das construções PH investigadas pelo PHI no mundo (Passipedia, 2014) ..8	
Figura 5.1 – As perdas e os ganhos numa PH típica (Feist et al., 2005)..... 17	17
Figura 5.2 – Necessidades de aquecimento e arrefecimento para diferentes orientações da área maior de envidraçados em habitações em Gotemburgo (Persson et al., 2006) 20	20
Figura 5.3 – Necessidades de aquecimento e arrefecimento para diferentes áreas de envidraçados em habitações em Gotemburgo (Persson et al., 2006) 21	21
Figura 5.4 – Equipamento do BDT instalado numa porta (PHI, 2014) 22	22
Figura 5.5 – Representação esquemática da envolvente do edifício. Em cima para a fachada e em baixo para a cobertura (Langmans et al., 2010) 25	25
Figura 5.7 – Exemplo de uma distribuição do sistema de ventilação mecânica com recuperação de calor numa habitação unifamiliar (Feist et al., 2005) 32	32
Figura 5.8 – Configuração da sala de EMPA avaliada no teste de câmara de fluxo de ar 34	34
Figura 5.9 – Visualização do fluxo de ar para as diferentes situações. Do lado esquerdo para bocal e do lado direito para a grelha. Em cima para a temperutra de 40 °C e em baixo para a temperatura de 16 °C. (Feist et al., 2005) 35	35
Figura 8.1 – Vista lateral do edifício (lado esquerdo da figura) e planta do edifício (lado direito da figura). Dimensões pelo exterior em metros 48	48

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 3.1 – Estratégias Bioclimáticas na estação de aquecimento (Gonçalves e Graça, 2004)	13
Quadro 3.2 – Estratégias Bioclimáticas na estação de arrefecimento (Gonçalves e Graça, 2004)	14
Quadro 3.3 – Síntese de algumas regras de boa prática para o clima de Portugal (Gonçalves e Graça, 2004)	14
Quadro 5.1 - Resultados da estanquidade do edifício para as diferentes fases de construção (Langmans et al., 2010)	27
Quadro 5.2 – Fluxo de ar através das diferentes ligações (Langmans et al., 2010)	28
Quadro 5.3 – Comparação entre o fluxo em condições de laboratório e <i>in situ</i> (Langmans et al., 2010)	29
Quadro 8.1 – Valores de F_g , de $g_{b,vi}$, de $g_{b,T}$ e de $g_{b,Tp}$	50
Quadro 8.2 - valores dos comprimentos e dos coeficientes de transmissão térmica linear de cada uma das ligações entre elementos	51
Quadro 8.3 – Resultados obtidos para a avaliação da eficiência do sistema de ventilação com recuperação de calor	52
Quadro 8.4 – Valores de Ψ para cada uma das ligações entre elementos	53
Quadro 8.5 – Resultados obtidos para a avaliação da ponte térmica linear	54
Quadro 8.6 – Valores de U para cada elemento	55
Quadro 8.7 – Resultados obtidos para a avaliação da espessura do isolamento térmico	56
Quadro 8.8 – Valores da área dos vãos envidraçados, após modificação da área na direção Norte e Sul	57
Quadro 8.9 – Resultados obtidos para a avaliação da área do vão envidraçado	58
Quadro 8.10 – Valores da área dos vãos envidraçados, após modificação da área na direção Oeste e Este	59
Quadro 8.11 – Resultados obtidos para a avaliação da área do vão envidraçado	60
Quadro 8.12 – Valores de B e de Ψ das ligações entre elementos	61
Quadro 8.13 – Resultados obtidos para $Q_{tr,i}$, $Q_{ve,i}$, $Q_{int,i}$ e $Q_{sol,i}$ na avaliação da condição de fronteira	62
Quadro 8.14 – Resultados obtidos para $Q_{g,i}$, $Q_{gu,i}$, N_{ic} e N_i na avaliação da condição de fronteira	63
Quadro 8.15 – Valores de α , g_{st} , B, Ψ e permeabilidade da caixa de estore para a avaliação do sombreamento	64
Quadro 8.16 – Resultados obtidos para a avaliação do sombreamento	65
Quadro 8.17 – Valores de α_h para a avaliação da exposição ao vento	65
Quadro 8.18 – Resultados obtidos para a avaliação da exposição ao vento	66

Quadro 8.19 – Valores obtidos de N_{ic} e N_i para a avaliação da localização67

ABREVIATURAS

AIF – Fibra de asfalto impregnado

CFC - Clorofluorcarbono

HCFC - Hidroclorofluorcarbono

EPS - Poliestireno Extrudido

NZEB – Nearly Zero Energy Buildings

PH – Passive House

PHI – Passive House Institute

PHPP – Passive House Planning Package

QAI – Qualidade do ar interior

REH – Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Habitação

UE – União Europeia

1. INTRODUÇÃO

1.1. Enquadramento e Motivação

A alteração climática é uma ameaça ambiental, social e económica que o planeta e a humanidade têm de enfrentar. A subida da temperatura média do planeta tem como principais causas o aumento da quantidade da queima de combustíveis fósseis (petróleo, gás natural e carvão) e o corte das florestas. Como consequência destas atividades, a quantidade de gases com efeito de estufa aumentou na atmosfera terrestre.

Como o demonstrado pelos países da Europa Central, onde já se construíram e monitorizaram habitações em conformidade com a norma *Passive House* (PH) as construções de baixa energia representam uma redução significativa no consumo de energia. Os edifícios construídos, conforme o padrão de PH, apresentam uma forma custo-eficiência de minimizar o consumo energético e ao mesmo tempo melhoram o conforto térmico dos seus habitantes. As restantes necessidades energéticas são colmatadas com o recurso a energia gerada por energias renováveis. Assim, pode-se afirmar que as PH podem ser uma parcela significativa na construção de um futuro sustentável. Para que este tipo de edifícios seja aceite no mercado, é necessário que os resultados das medições de consumos e da satisfação dos ocupantes nos projetos-piloto sejam aceites.

1.2. Objetivos

Estando o comportamento térmico dos edifícios condicionado pelas condições climáticas, pode prever-se a possibilidade de variação dos requisitos técnicos a aplicar em função da localização. Assim, pretende-se com este estudo a comparação entre duas metodologias: *Passive House Planning Package* (PHPP) utilizada mundialmente e Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Habitação (REH) utilizada em Portugal. Para a execução deste trabalho, selecionou-se, em primeiro, um edifício minimalista, onde a área é representativa e o aspeto arquitetónico não influencie a avaliação das variáveis. Seguidamente, o edifício foi simulado utilizando o programa em Excel de ambas as metodologias e avaliou-se a importância de algumas variáveis, nomeadamente, a eficiência do sistema de ventilação mecânica com recuperação de calor; as pontes térmicas lineares; a espessura do isolamento; a área de vãos envidraçados; a exposição ao vento; os dados climáticos em função da localização do edifício; as condições de fronteira e o sombreamento.

1.3. Estrutura da Dissertação

Esta dissertação divide-se em nove capítulos, sendo o primeiro relativo à introdução do trabalho desenvolvido (capítulo atual). No capítulo 2 foi efetuada uma breve revisão

bibliográfica sobre a eficiência energética e onde se inclui um breve enquadramento da legislação portuguesa dentro da temática referida. No capítulo 3 foi referido o significado do conceito PH, bem como a sua origem, desenvolvimento, implementação e os seus princípios fundamentais. No capítulo 4 foi descrito o sistema de certificação energética e a certificação PH. No Capítulo 5 foi feita uma breve revisão bibliográfica sobre os requisitos técnicos para edifícios PH. No capítulo 6 foi revista bibliograficamente a modelação energética. No capítulo 7 foi feita uma breve exposição das metodologias de cálculo das necessidades de energia para o aquecimento utilizadas neste trabalho. No capítulo 8 foi avaliada a importância das variáveis. No capítulo 9 é o capítulo referente às conclusões obtidas com o estudo. Foi incluído neste capítulo, uma ligeira abordagem de possíveis trabalhos a realizar no futuro.

2. A EFICIÊNCIA ENERGÉTICA

2.1. A Eficiência Energética em Edifícios

A questão sobre o aquecimento global fez com que aumentasse a procura de alternativas amigas do ambiente com vista a manter o padrão de vida e o nível de atividade. Como forma de mitigar este desequilíbrio do planeta, vários países, entre eles Portugal, subscreveram o Protocolo de Quioto. Os países que subscreveram este protocolo teriam que reduzir a emissão de gases com efeito de estufa em todos os setores consumidores de energia no qual também se engloba os edifícios (Audenaert et al, 2008).

O setor residencial e comercial (incluindo o institucional) corresponde a 17% de todas as emissões de GEE. Uma redução significativa no valor das necessidades de energia pode ser alcançada através da promoção de edifícios de baixo consumo energético. Este potencial oferece oportunidades significativas para atingir os objetivos de Quioto (Audenaert et al, 2008).

As PH oferecem uma opção viável para atender às necessidades de energia remanescentes apenas com fontes renováveis, dentro dos limites de disponibilidade de energia renovável e acessibilidade (Audenaert et al, 2008).

2.2. Viabilidade Económica de Edifícios

Em (Audenaert et al, 2008) foi realizada uma análise económica, com a finalidade de comparar o potencial de edifícios convencionais, edifícios de baixo consumo de energia e edifícios PH de um ponto de vista econômico investimento. A análise baseia-se em 11 edifícios, localizados na Bélgica, divididos em três categorias: edifícios convencionais (3), edifícios de baixo consumo de energia (3) e edifícios PH (5). A partir deste estudo, pode concluir-se que o custo extra de edifícios de baixa energia é de 4% e de edifícios PH é de 16% em comparação com edifícios convencionais. O isolamento e a ventilação são as principais causas para este custo excedente (Audenaert et al, 2008).

Com base no preço do gás na Bélgica no momento do estudo, os custos de energia são calculados para os diferentes tipos de edifícios. Esta análise mostra que o tempo de equilíbrio é sempre mais curto para os edifícios de baixa energia do que para a casa passiva, sendo muito dependente do crescimento dos preços de energia. Para um crescimento anual de 9%, o tempo de retorno é de 20 anos (Audenaert et al, 2008).

Os edifícios de baixa energia é a escolha mais segura com um impacto mínimo sobre o orçamento familiar, considerando os preços de energia constantes. Os edifícios PH têm para os primeiros 20 anos uma influência negativa sobre o orçamento. Após 20 anos, os edifícios de baixa energia e os edifícios PH têm um impacto positivo no orçamento anual da família (Audenaert et al, 2008).

O impacto do edifício PH é fortemente dependente da evolução dos preços de energia. No caso dos preços da energia aumentarem 5%, o impacto sobre o orçamento familiar é significativamente negativo para um prazo de 20 anos. No caso dos preços da energia aumentarem 10%, o edifício PH torna-se rentável após 20 anos. No caso de um crescimento anual de 15%, o edifício PH torna-se muito rentável. Como a energia taxa de crescimento de preços é imprevisível, um edifício de baixa energia é a escolha mais segura, porque o seu lucro está menos dependente dos preços de energia. Uma análise realizada com diferentes fontes de energia poderia lançar uma nova luz sobre os resultados, provavelmente em favor dos edifícios de baixa energia e PH (Audenaert et al, 2008).

2.3. Enquadramento Legislativo em Portugal

Os primeiros requisitos térmicos existentes em Portugal foram definidos em 1990 com a publicação do Decreto-Lei n.º 40/90, de 6 de fevereiro, que originou o RCCTE. Em 1998, foi publicado o Decreto-Lei n.º 119/98, de 7 de maio que originou o RSECE. Para transpor para o direito nacional a Diretiva Comunitária 2002/91/CE, em 2006, o governo português promulgou três Decretos-Lei: Decreto-Lei n.º 80/2006 de 4 de Abril – RCCTE que substituiu o Decreto-Lei n.º 40/90, de 6 de fevereiro, Decreto-Lei n.º 79/2006 de 4 de abril – RSECE que substituiu o Decreto-Lei n.º 119/98, de 7 de maio e o Decreto-Lei n.º 78/2006 de 4 de abril - SCE.

Em 2010, foi publicada a Diretiva n.º 2010/31/UE, do Parlamento Europeu e do Conselho, de 19 de maio de 2010, relativa ao desempenho energético dos edifícios. Esta diretiva veio reformular o regime estabelecido pela Diretiva n.º 2002/91/CE, do Parlamento Europeu e do Conselho, de 16 de dezembro de 2002, clarificando alguns dos princípios do texto inicial e introduzindo novas disposições que visam o reforço do quadro de promoção do desempenho energético nos edifícios, à luz das metas e dos desafios acordados pelos Estados-Membros para 2020.

Para transpor para a legislação nacional a Diretiva n.º 2010/31/UE, do Parlamento Europeu e do Conselho, de 19 de maio de 2010, foi publicado o Decreto-Lei n.º 118/2013 de 20 de agosto. O diploma visa assegurar e promover a melhoria do desempenho energético dos

edifícios através do Sistema Certificação Energética dos Edifícios (SCE), que integra o Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Habitação (REH), e o Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Comércio e Serviços (RECS).

Com base nestas medidas aprovadas, caminha-se no sentido da melhoria da eficiência energética do edificado nacional e criam-se instrumentos e metodologias de suporte à definição de estratégias, planos e mecanismos de incentivo à eficiência energética.

3. CONCEITO *PASSIVE HOUSE*

3.1. Qual é o significado de ser *Passive House*

O conceito subjacente ao PH baseia-se numa abordagem global, em que existe uma melhoria rendimento térmico da envolvente do edifício de forma a permitir uma simplificação substancial do sistema de aquecimento. Os edifícios segundo a norma PH oferecem maior conforto a custos acessíveis, reduzindo significativamente o consumo de energia (Feist et al., 2005).

A definição oficial do conceito PH adotada pelo PHI é “um edifício no qual o conforto térmico pode ser alcançado apenas através do aquecimento ou arrefecimento posterior da massa de ar novo que é exigida para alcançar as condições suficientes da qualidade do ar interior, sem ser necessária uma recirculação adicional de ar”. Ou seja, se o edifício for bem isolado, estanque e tiver um sistema de ventilação com recuperação calor, o calor necessário para o aquecimento do edifício pode ser obtido pelo sistema de ventilação, uma vez que, o ar novo que entra dentro do edifício é aquecido e o calor transportado por este ar aquece o edifício (Passipedia, 2014).

É de salientar que num edifício construído segundo a norma PH é possível a utilização de sistemas solares ativos para a preparação de AQS e para o sistema de aquecimento do edifício. O valor da energia solar recolhida utilizada para a preparação AQS pode chegar a ser 10 vezes maior do que o valor da energia utilizada para o aquecimento de espaços. O valor da necessidade de energia anual para o sistema de AQS poderá atingir os 77% da necessidade de energia anual para os dois sistemas (sistema de preparação de AQS e sistema de aquecimento do edifício) (Badescu, 2005). Assim, pode afirmar-se que o sistema solar ativo é vantajoso para a preparação de AQS, tornado o edifício energeticamente mais eficiente.

Em suma, *Passive House* é um conceito construtivo que define um padrão que é eficiente energeticamente, confortável, económico e ecológico, independente da zona climática e da tendência e estilo arquitetónicos.

3.2. Origem e Desenvolvimento do Conceito

Desde os anos 70 que têm sido desenvolvidas diferentes estratégias com o objetivo de reduzir a procura energética dos edifícios, entre elas o uso solar ativo e passivo e redução de perdas (Feist et al., 2005).

O padrão de edifícios de baixa energia surgiu, na década de 80, após as crises do petróleo (Badescu, 2005). Para o desenvolvimento deste conceito foram aproveitados os conhecimentos adquiridos com experiências anteriores na procura do conforto. As experiências levadas a cabo nas décadas de 1970 e 1980 como as casas super-isoladas ou as casas solares passivas foi fundamental para a definição do que é hoje uma *Passive House* (Passipedia, 2014).

O primeiro edifício segundo o padrão PH foi construído em Kranichstein, Alemanha, no ano de 1991. As características deste projeto marcam uma evolução na construção (Badescu, et al.,2011). Foi criado o *Passive House Institute* (PHI), instituto de investigação independente, liderado pelo Dr. Wolfgang Feist e sediado em Darmstadt, Alemanha. Tem desempenhado um papel fundamental no desenvolvimento do conceito PH através do desenvolvimento e aperfeiçoamento de software (PHPP), do teste e da certificação de edifícios e componentes de construção e da formação e certificação de profissionais (PHI, 2014).

Entre 1998 e 2008, foram implementados e desenvolvidos vários projetos que visavam a introdução, a promoção e o desenvolvimento deste conceito em vários países da Europa com diferentes climas.

Até 2005 foram construídos mais de 6000 edifícios segundo o conceito PH, 4000 dos quais se localizam na Alemanha (Badescu, et al.,2011).

Em Bragadiru (10 km a Sul de Bucareste, Roménia) foi construído, pela companhia AMVIC, o primeiro edifício de escritório romeno segundo a norma PH. Este projeto gerou mais conhecimento sobre soluções para o projeto de edifícios PH, não só para edifícios de escritórios, como para edifícios situados na Europa Oriental (Badescu, et al., 2010) e (Badescu, et al., 2011).

Em Portugal, foram construídas pela Homegrid duas casas unifamiliares, que são as primeiras PH em Portugal. Estes edifícios localizam-se em Ílhavo, uma localidade no centro norte de Portugal. O clima nesta zona encontra-se na transição entre o clima oceânico e o clima mediterrânico. Inicialmente, o projeto destas moradias não seguia a filosofia PH, sendo já no início da fase de construção que o projeto foi adaptado de modo a atingir os padrões PH e a sua certificação. Foi, durante a *15ª Conferência Internacional Passive House*, que a Homegrid definiu a estratégia para adaptar os projetos ao conceito PH (Marcelino e Gavião, 2012). No nosso país, este conceito está a dar os primeiros passos, sendo que existem apenas dois edifícios em todo o parque habitacional constituído por 3 544 389 edifícios, onde 63,1% dos quais foram construídos a partir de 1971 (INE, 2013).

Mais recentemente, foi criada a Associação Passivhaus Portugal (PHPT) e é o associado português da *Internacional Passive House Association* (IPHA). Esta associação tem como objetivos a promoção e o desenvolvimento o conceito PH em Portugal, a definição de um caminho credível que contribua para a independência energética e sustentabilidade de Portugal e a promoção de formação (PHPT, 2014).

O conceito PH não está só implementado na Europa, mas um pouco por todos os continentes do mundo e em diferentes climas, como pode ser observado pelo mapa da figura 3.1 (Passipedia, 2014).

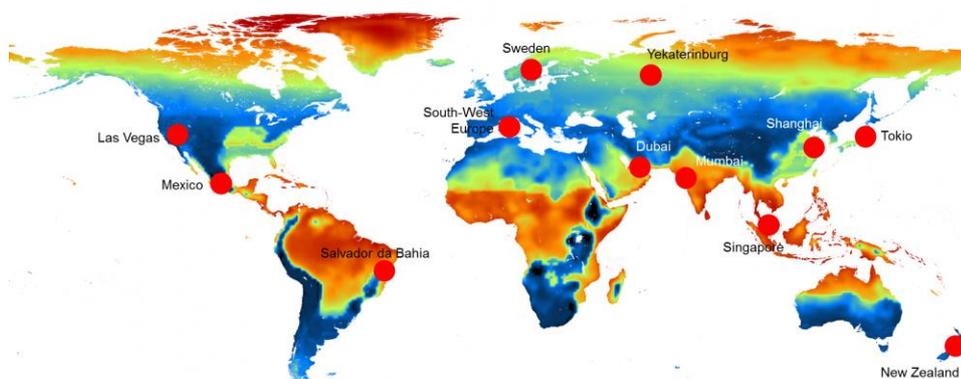


Figura 3.1– Mapa das construções PH investigadas pelo PHI no mundo (Passipedia, 2014)

3.3. Projetos de Implementação do Conceito

A UE tem divulgado, promovido e implementado o conceito de PH, nos países membros, com o recurso a diversos projetos, tais como, PEP, Passive On e CEPHEUS.

3.3.1. CEPHEUS

O projeto Cost Efficient Passive Houses as European Standards (CEPHEUS) durou quatro anos, entre janeiro de 1998 e dezembro de 2001. Este projeto envolve a construção e avaliação científica de 221 fogos em edifícios habitacionais com os padrões de PH em cinco países (Alemanha, Áustria, Suíça, França e Suécia). Teve como propósito testar e comprovar a viabilidade técnica do conceito concretizado por diferentes equipas em diferentes países; possibilitar, tanto ao público leigo como a especialistas, a oportunidade de experimentar pessoalmente um edifício construído segundo o padrão PH e estudar e criar condições para a

ampla introdução no mercado de edifícios construídos segundo este padrão (Schnieders e Hermelink, 2006).

Em nove dos edifícios estudados no projeto, as taxas de fuga de ar remanescentes variou entre $0,3 \text{ h}^{-1}$ e $0,6 \text{ h}^{-1}$. Na maioria dos outros edifícios, seria possível obter um melhor resultado efetuando trabalhos de reparação das ligações entre elementos onde foram identificadas infiltrações de ar. Quanto ao valor do consumo de energia para o aquecimento, a diferença é maior entre valores do mesmo projeto do que entre projetos. Este resultado é devido não só as diferenças entre as construções dos edifícios como ao fato de as temperaturas interiores serem diferentes, com particular impacto nos edifícios multifamiliares. A poupança foi menor nos projetos que ainda não foram totalmente concluídos ou onde os ocupantes se mudaram durante ou pouco tempo antes do período de medição. Em todos os edifícios que foram ocupados por um longo período, a poupança é superior a 80%. Em média, os valores de consumo de energia para o aquecimento de AQS correspondem aproximadamente aos valores de referência, isto é, ao valor do consumo típico de unidades habitacionais com taxas de ocupação comparáveis (25 litros por pessoa por dia a 60°C). O consumo de AQS é, também, uma das exigências de conforto dos ocupantes de PH, sendo que o estudo demonstra que as exigências dos ocupantes dos projetos CEPHEUS não se desviam significativamente da média geral. Os resultados obtidos, em todos os projetos, para o consumo de energia primária são extremamente baixos. Comparativamente com edifícios novos convencionais, a economia de energia útil, primária e final é de mais de 50% (Schnieders e Hermelink, 2006).

O valor da temperatura média interior medida, no inverno (1 de novembro a 28 de fevereiro), é superior a 20°C , em todos os projetos CEPHEUS, em todas as zonas ocupadas e durante todo o período de medição. Relativamente ao valor da temperatura média interior medida, no verão (1 de maio a 31 de agosto), os resultados obtidos mostram que as temperaturas de verão em PH podem ser mantidas num nível confortável. Os ocupantes podem obter temperaturas confortáveis no verão se tiverem um comportamento adequado de ventilação. Os índices de ocupação e os elementos de sombreamento são importantes, mas secundários quando comparados com o comportamento relativamente à ventilação (Schnieders e Hermelink, 2006).

Em dois dos projetos CEPHEUS na Alemanha foram realizados estudos de ciências sociais. Os resultados revelam elevados níveis de satisfação dos proprietários de PH. Relativamente à satisfação do clima interior no inverno é indicado pela grande maioria dos ocupantes como boa ou muito boa, sendo que nenhum ocupante deu nota negativa. As temperaturas de superfície mais altas e a distribuição de temperatura em todo o espaço são experimentados como altamente agradável quando comparado com os edifícios convencionais. Em relação à satisfação do clima interior no verão, 88% dos ocupantes dos edifícios em estudo mostraram-

se satisfeitos ou muito satisfeitos. A qualidade do ar é considerada por 95% dos ocupantes como boa ou muito boa, sendo que não existe nenhuma avaliação negativa. Não existe nenhuma avaliação negativa do sistema de ventilação sem recuperação de calor. (Schnieders e Hermelink, 2006)

3.3.2. Projeto Orientado para Utilizadores de Casas Passivas

O projeto *User-oriented design of Passive Houses*, em português, projeto orientado para utilizadores de casas passivas é um projeto de investigação e foi realizado durante dois anos e meio. Teve como principal objetivo conhecer os requisitos que as PH têm que cumprir para serem capazes de atingir uma quota significativa no mercado de construção, contribuindo para um futuro mais sustentável. Esta investigação teve por base os seguintes elementos (Schnieders e Hermelink, 2006):

- Análise do comportamento do utilizador, por meio de investigações baseadas em ciências sociais;
- Investigação detalhada dos motivos do comportamento do utilizador;
- Implementar e avaliar medidas para melhorar as “deficiências” técnicas e comportamentais.

O primeiro aspeto a ser estudado foi os motivos que levaram as pessoas a mudarem-se para estas habitações. O motivo menos referido foi *Passive House* e o mais referido foi a existência de uma varanda. O valor da temperatura média medida é de 21,5°C, sendo que o valor médio das temperaturas que sentidas pelos moradores corresponde ao valor médio medido. Devido ao isolamento da envolvente, a temperatura de superfície é muito próxima da temperatura do ar. Os valores das temperaturas do ar interior não são mais baixas do que em edifícios convencionais, sendo que, assim, nos edifícios PH existe um ganho de conforto devido às temperaturas elevadas (Schnieders e Hermelink, 2006).

É evidente a relação entre a ventilação manual e a avaliação da ventilação automática controlada. Existe uma correlação significativa entre a alta ventilação manual e a baixa opinião expressa sobre a ventilação controlada. Para além desta parte mais voltada para o sistema de aquecimento, os utilizadores foram convidados a avaliar o sistema de ventilação em relação a outras características, como o ruído dos ventiladores, a produção da temperatura desejada, controlabilidade e remoção de odores. A opinião expressa sobre todas estas características melhorou após o primeiro inverno, sendo os problemas resolvidos com ligeiras melhorias no manuseamento e na informação facultada aos utilizadores (Schnieders e Hermelink, 2006).

Os resultados obtidos mostram que a maioria dos utilizadores se adaptou muito rapidamente à invulgar envolvente dos edifícios PH. Os utilizadores sentem-se muito confortáveis devido ao fácil controlo da ventilação, ao elevado conforto térmico, à elevada qualidade do ar e aos extremamente baixos custos de aquecimento. Esta aceitação de PH por parte dos utilizadores é de crucial importância para a comercialização deste tipo de edifícios (Schnieders e Hermelink, 2006).

3.3.3.PEP

O projeto PEP, que significa *Promotion of European Passive Houses*, é um consórcio de parceiros europeus, financiados pela Comissão Europeia. O objetivo do projeto é a introdução e promoção do conceito *Passive House* nos países participantes e apoiar todos os intervenientes no processo construtivo. O projeto durou três anos (janeiro 2005 a janeiro 2008) e onde participou um conjunto mais alargado de países europeus relativamente ao projeto CEPHEUS. Este projeto permitiu estabelecer as bases para a implementação do conceito PH em países das regiões norte, centro e sul da Europa (Elswijk e Kaan, 2008).

3.3.4.PASSIVE-ON

O projeto Passive-On foi implementado paralelamente ao PEP, difundindo o conceito PH nos países quentes da Europa, e decorreu entre janeiro de 2005 e setembro de 2007. Portugal foi um dos países participantes neste projeto, juntamente com a Espanha, França, Itália e Reino Unido, alargando o conceito PH através da definição de um limite para as necessidades de arrefecimento (Passive-On, 2007).

3.4.Os Princípios Fundamentais do Conceito *Passive House*

Os princípios do conceito de PH são a redução de perdas de calor através de ganhos internos, recorrendo a um excelente isolamento térmico dos elementos da envolvente exterior, à eliminação de pontes térmicas, a uma envolvente externa estanque e a ventilação mecânica com recuperação de calor. Em alguns edifícios construídos com base neste conceito, é utilizada massa térmica para reduzir o sobreaquecimento no verão e manter as temperaturas no inverno. Existem edifícios segundo a norma PH que utilizam energias renováveis para o aquecimento de água e geração de eletricidade.

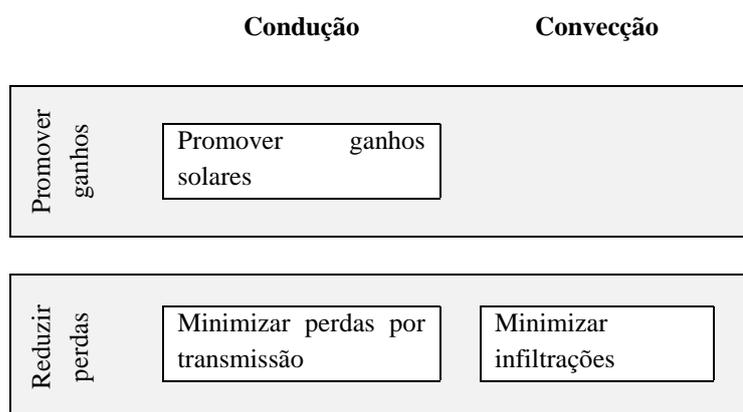
3.5. *Passive House* versus Solar Passivo

Os conceitos PH e solar passivo são duas abordagens com algumas semelhanças. O solar passivo utiliza o calor e a luz do Sol para facilitar o aquecimento e a iluminação do edifício.

Estes edifícios são projetados de forma a aproveitar ao máximo a luz do Sol, reduzindo a sua dependência de energia elétrica. O projeto de um edifício solar passivo ou bioclimático tem como objetivo a obtenção natural das condições de conforto dos seus utilizadores. Este projeto deve começar pela escolha criteriosa da orientação do edifício para uma otimização dos ganhos solares. É também relevante nesta fase conhecer se o clima é favorável a esses ganhos solares nas várias estações do ano e os cuidados a ter ao nível das proteções solares no período da estação de aquecimento. O desempenho de um edifício, em termos de conforto térmico e dos seus ocupantes, é significativamente influenciado pela adoção de certas estratégias, na fase de conceção desse mesmo edifício. As estratégias bioclimáticas são simplesmente regras ou medidas de carácter geral que se destinam a orientar e influenciar a forma do edifício, bem como os seus sistemas e componentes construtivos. Estas estratégias devem ser selecionadas em função da especificidade do clima local e do tipo de utilização do mesmo. Nos Quadros 3.1 e 3.2 apresentam-se algumas das estratégias bioclimáticas que podem ser utilizadas, respetivamente, nas estações de aquecimento e de arrefecimento e no Quadro 3.3 apresenta-se uma síntese de algumas regras de boa prática para o clima de Portugal (Gonçalves e Graça, 2004).

Em Portugal, foram construídos, nos anos 80 e 90 do século XX, alguns edifícios nos quais a energia solar (solar e lumínica) é utilizada com o objetivo de melhorar as condições de conforto. Estes edifícios têm diferentes tipologias que vão desde habitações familiares, a escolas e a grandes edifícios (institutos de investigação e blocos de apartamentos). (Gonçalves e Graça, 2004)

Quadro 3.1 – Estratégias Bioclimáticas na estação de aquecimento (Gonçalves e Graça, 2004)



Quadro 3.2 – Estratégias Bioclimáticas na estação de arrefecimento (Gonçalves e Graça, 2004)

	Condução	Convecção	Radiação	Evaporação
Evitar ganhos	Minimizar ganhos por transmissão	Minimizar infiltrações	Minimizar ganhos solares	
Promover perdas	Promover perdas pelo solo	Promover ventilação	Promover arrefecimento por radiação	Promover arrefecimento por evaporação

Quadro 3.3 – Síntese de algumas regras de boa prática para o clima de Portugal (Gonçalves e Graça, 2004)

	Incidência Solar	Perdas de Calor	Ventilação Natural
Inverno	Promover os ganhos por radiação, sendo benéfico a abertura de vão envidraçados no quadrante Sul.	Restringir as perdas de calor para o exterior através da envolvente.	Limitar as infiltrações , a temperatura exterior apresenta praticamente sempre valores abaixo das condições de conforto, assegurando o valor mínimo recomendável.
Verão	Restringir os ganhos por radiação, os vãos envidraçados a Poente e Nascente sejam dotados de dispositivos sombreadores eficazes.	Restringir os ganhos excessivos de calor exterior, mantendo uma temperatura mais constante no interior do edifício.	Arrefecimento noturno do edifício.

3.6. *Passive House* como Padrão para NZEB

Como foi referido na seção 2.4, a diretiva europeia 2010 Diretiva n.º 2010/31/EU de 19 de maio define que todos os estados membros devem tomar medidas e criar condições para que, a partir de 2020, todos os edifícios novos sejam Nearly Zero-Energy Building (NZEB).

Esta mesma diretiva define um NZEB como um edifício com um desempenho energético muito elevado. Isto é, um edifício onde as necessidades energéticas quase nulas ou muito

pequenas deverão ser cobertas, sobretudo, por energia proveniente de fontes renováveis, energia esta produzida em fontes renováveis no local ou na proximidade.

A redução de consumos energéticos deve ser atingida com recurso a soluções já disponíveis, assentes numa larga experiência e longe de serem conceitos meramente experimentais, como é exemplo a norma PH. Em Portugal, podem ser atingidos os valores limites das necessidades de aquecimento e arrefecimento através de um aumento da espessura do isolamento na envolvente opaca exterior e da utilização de vidros duplos com baixa emissividade (Ribas, 2012).

Estas práticas já estão a tornar-se comuns no nosso país não acarretando uma dificuldade acrescida nem um sobrecusto incomportável (Ribas, 2012).

Para que os edifícios NZEB tenham aceitação no mercado é necessário que os níveis de satisfação do utilizador final sejam altos. Um estudo realizado na Alemanha e na Áustria indica que a eficiência energética de uma habitação é um aspeto importante, mas não é suficiente para que o utilizador escolha a habitação. Terão sempre que ser utilizados como argumentos outros fatores como o preço, a localização, o tamanho, a localização e a vizinhança. Assim, é fundamental que exista uma garantia de qualidade e que a informação para os utilizadores deste tipo de habitações seja melhor veiculada (Melcnik et al, 2012).

4. CERTIFICAÇÃO

4.1. SISTEMA DE CERTIFICAÇÃO ENERGÉTICA

Devem ser certificadas todas as frações e edifícios destinados a habitação unifamiliar, nos termos dos artigos 3º, 4º e 5º do DL n.º 118/2013 de 20 de agosto. Devem ser certificadas frações que se preveja virem a existir após constituição de propriedade horizontal, designadamente nos edifícios recém-constituídos ou meramente projetados. Deve ser certificado todo o edifício de comércio e serviços que disponha de sistema de climatização centralizado para parte ou para a totalidade das suas frações, estando neste caso dispensadas de certificação as frações. Podem ser certificados os edifícios, considerando-se sempre certificado um edifício quando estejam certificadas todas as suas frações.

A Fiscalização do SCE é da competência da Direção-Geral de Energia e Geologia (DGEG), a Gestão do SCE é atribuição da ADENE e o acompanhamento da QAI compete à Direção-Geral da Saúde e à Agência Portuguesa do Ambiente, I.P..

Os Técnicos do SCE São técnicos do SCE os PQ e os TIM. O acesso e exercício da atividade dos técnicos do SCE, o seu registo junto da ADENE e o regime contraordenacional aplicável são regulados pela Lei n.º 58/2013, de 20 de agosto. Compete aos PQ, fazer a avaliação energética dos edifícios a certificar no âmbito do SCE, não comprometendo a qualidade do ar interior; identificar e avaliar, nos edifícios objeto de certificação, as oportunidades e recomendações de melhoria de desempenho energético, registando-as no pré-certificado ou certificado emitido e na demais documentação complementar; emitir os pré-certificados e certificados SCE; colaborar nos processos de verificação de qualidade do SCE e verificar e submeter ao SCE o plano de racionalização energética. Compete ao TIM coordenar ou executar as atividades de planeamento, verificação, gestão da utilização de energia, instalação e manutenção relativo a edifícios e sistemas técnicos, nos termos previstos neste diploma.

4.2. CERTIFICAÇÃO PH

Existem três grupos diferentes de certificação PH: edifícios, pessoas e componentes.

Um edifício é certificado segundo os requisitos PH, *Certified Passive House*, se cumprir os requisitos PH. Os critérios variam consoante a utilização, residencial ou não-residencial, do edifício novo. O cálculo, a análise do projeto e das soluções e a validação é efetuada através do PHPP. A certificação é feita pelo PHI ou por uma entidade credenciada por este (PHI, 2014).

Nem sempre um edifício já existente reabilitado cumpre os requisitos PH. Assim, o PHI criou a certificação de edifícios existentes reabilitados, *EnerPHit*. Os requisitos desta certificação são menos exigentes que os indicados para os novos edifícios e permite reconhecer a melhoria na renovação. O cálculo, a análise do projeto e das soluções e a validação é efetuada através do PHPP. A certificação é feita pelo PHI ou por uma entidade credenciada por este (PHI, 2014).

Na certificação de pessoas existem dois tipos de certificações: *Certified Passive House Designers* e *Certified Passive House Tradesperson*. A primeira garante, ao cliente, que o projetista tem os conhecimentos e a experiência necessários para conceber e construir uma PH. A segunda foi concebida para a qualificação dos diversos intervenientes no setor da construção. Esta certificação é efetuada por uma entidade independente, o PHI (PHI, 2014).

A certificação de produtos ou sistemas construtivos, *Certified Passive House Component*, permite garantir aos projetistas e construtores a utilização de sistemas testados e avaliados segundo critérios específicos PH. A utilização destes sistemas certificados permite assegurar, de uma forma mais fácil, o funcionamento mais eficiente de uma PH. Esta certificação é efetuada, também, pelo PHI (PHI, 2014).

5. REQUISITOS TÉCNICOS PARA EDIFÍCIOS PH

Para países com o clima como o da Europa central, a carga máxima de aquecimento espaço corresponde a um valor de necessidade de aquecimento abaixo de 15 kWh/(m²a). Ou seja, o valor das perdas (transmissão e ventilação) é da mesma ordem de grandeza que o valor dos ganhos (solar, interno e sistema aquecimento), como é mostrado na figura 6.1.

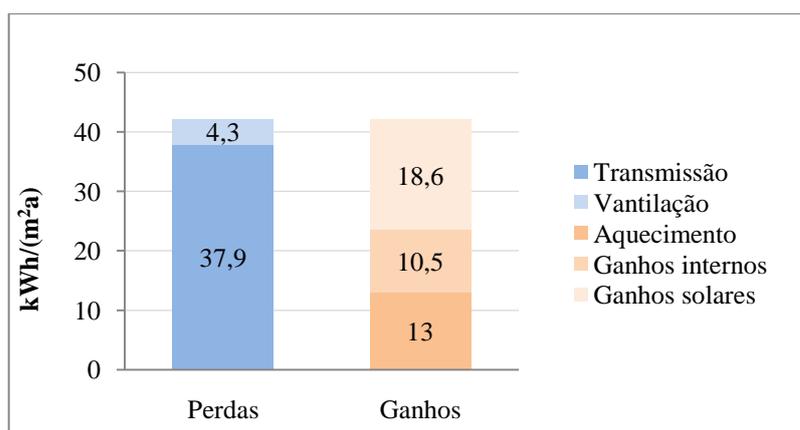


Figura 5.1 - As perdas e os ganhos numa PH típica (Feist et al., 2005)

Na norma PH, os requisitos são definidos para o edifício como um todo, em vez de requisitos para componentes individuais. O foco não pode ser restringido ao aquecimento, mas tem que incluir o uso de energia relacionado com todo o edifício, isto é, tem de incluir a energia dispensada para o aquecimento, para as águas quentes sanitárias, para bombas, para controle, para eletrodomésticos,... (Feist et al., 2005)

Os requisitos técnicos para que um edifício seja classificado como uma PH são:

- ✓ Necessidade de energia para o aquecimento inferior a 15 kWh/(m².a);
- ✓ Necessidade de energia para o arrefecimento inferior a 17 kWh/(m².a);
- ✓ Necessidade de energia primária inferior a 120 kWh/(m².a);
- ✓ Menos de 0,6 renovações de ar por hora a 50 Pa;
- ✓ Sistema de ventilação com recuperação de calor

Como num edifício construído seguindo a norma PH o valor das necessidades de energia para o aquecimento é largamente reduzido, as fontes de energia renováveis podem ser utilizadas para atender à procura de energia a baixo custo. Muitas vezes, os sistemas solares térmicos são instalados nestes edifícios (Schnieders e Hermelink, 2006). Entende-se por energia renovável, a energia de fontes não fósseis renováveis, designadamente eólica, solar,

aerotérmica, geotérmica, hidrotérmica e oceânica, hídrica, de biomassa e de biogás (REH, 2013).

5.1. Especificidades das Soluções Construtivas

5.1.1. Isolamento Térmico da Envolvente Opaca

O isolamento térmico é um material ou combinação de materiais que, quando aplicado corretamente, retarda a velocidade do fluxo de calor por condução, convecção e radiação. Este retardamento do fluxo de calor para dentro ou para fora de um edifício deve-se à sua elevada resistência térmica (Sadineni et al., 2011).

Um modo simples e eficaz para melhorar a eficiência energética de um edifício é melhorar o desempenho do isolamento térmico da envolvente. Este melhoramento é obtido colocando o isolamento perto da superfície interior da envolvente do edifício, em regiões onde o aquecimento é dominante, e perto da superfície exterior, nas regiões onde o arrefecimento é dominante. Tipicamente, para uma parede de 50 cm de espessura, a espessura do material de isolamento é de cerca de 25 a 30 mm, dependendo das normas de construção e regulamentos do país onde o edifício é construído (Sadineni et al., 2011).

A condutibilidade térmica e a inércia térmica são os fatores mais importantes que afetam a seleção do isolamento térmico a aplicar num edifício, uma vez que, o desempenho do isolante diminui, com o aumento da condutibilidade térmica. Os impactos ambientais e de saúde também são fatores importantes na escolha de um isolamento apropriado. O CFC e HCFC gradualmente emitido ao longo do ciclo de vida de alguns materiais de isolamento, como o EPS, revelam-se prejudiciais para o meio ambiente devido à destruição da camada de ozono, potenciando o aquecimento global. A fibra de vidro é um material isolante conhecido por causar problemas de saúde relacionados com doenças respiratórias, especialmente para o pessoal que o manuseia. A inflamabilidade é também um fator importante na seleção de materiais (Sadineni et al., 2011).

Existem vários tipos de materiais isolantes e em diferentes formas físicas:

- ✓ Manta de fibra mineral: placas e rolos (fibra de vidro e lã de rocha);
- ✓ Preenchimento solto que pode ser injectado (de fibra de vidro, lã de rocha);
- ✓ Vertido ou misturado no cimento (celulose, perlite, vermiculite);
- ✓ Placas rígidas (poliestireno, poliuretano, poliisocianurato, e fibra de vidro);
- ✓ Espuma ou pulverizado no local (poliuretano e poliisocianurato);
- ✓ Placas ou blocos (perlite e vermiculite);
- ✓ Materiais reflexivos (folha de alumínio e revestimentos cerâmicos).

Em PH, os valores de U dos elementos da envolvente opaca exterior variam geralmente entre 0,1 e 0,15 W/(m²K). As perdas de transmissão de calor incluem não apenas os fluxos de calor por meio dos elementos contínuos, mas também os fluxos que passam pelas ligações entre elementos. As perdas excessivas em tais pontes térmicas devem ser evitadas. Além disso, as pontes térmicas constituem um risco para a condensação e o conforto é reduzido pela infiltração (Feist, et al., 2005).

5.1.2.ENVIDRAÇADOS

Os envidraçados desempenham um papel vital no fornecimento de conforto térmico e de níveis de iluminação ideais a um edifício. Nos últimos anos, houve avanços significativos nas tecnologias de vidros. Essas tecnologias incluem vidros de controlo solar, unidades de vidro isolante, revestimentos de baixa emissividade, vidro em vácuo e aerogéis (Sadineni et al., 2011).

Em simulações realizadas num estudo, onde foram ensaiados dez tipos de vidros diferentes aplicados a cinco zonas climáticas diferentes da Índia, observou-se que a economia de energia anual de uma janela é dependente não apenas do valor da condutividade térmica e do valor do coeficiente de ganhos solares, mas também da sua orientação, das condições climáticas e de parâmetros de construção, como a área de pavimento (Sadineni et al., 2011).

Os valores de U para as janelas são tipicamente baixos, na ordem de 0,8 W/(m²K) para a Europa Central (Feist, et al., 2005). Os componentes dos caixilhos e dos espaçadores das janelas devem minimizar as pontes térmicas e perdas por infiltração. O efeito dos espaçadores é mais pronunciado em janelas de menores dimensões (Sadineni et al., 2011).

Geralmente, as grandes áreas das janelas de um edifício são instaladas na fachada orientada de forma a maximizar os ganhos pela energia solar (no caso do hemisfério Norte são orientadas a Sul), enquanto as áreas de janelas na fachada orientada a Norte são menores (no caso do hemisfério Norte). Nos meses frios, existe menos radiação solar disponível, especialmente em latitudes elevadas. Assim, a orientação da fachada onde se localiza a maior área de envidraçado é de menor importância assim como o tamanho do envidraçado, no caso de edifícios localizados em latitudes elevadas. Pode, então, afirmar-se que o tamanho do envidraçado é relevante dependendo do clima em que o edifício se localiza (Persson et al., 2006).

Na figura 5.2, as necessidades anuais de energia para aquecimento e arrefecimento são mostradas para as diferentes orientações das casas. Na figura, os valores positivos

representam a necessidade de aquecimento e os valores negativos a necessidade de arrefecimento. Mostra-se que é necessário menos energia para o aquecimento, se as casas são colocadas com uma grande área de envidraçado orientado para Sul. Orientando os envidraçados para Oeste ou para Este não influencia visivelmente o equilíbrio energético. É, então, possível orientar as casas de maneira diferente sem perder muita energia. Estes resultados foram obtidos através da simulação no Modelo de DEROB - LHT de uma casa geminada com janelas em diferentes orientações (Persson et al., 2006).

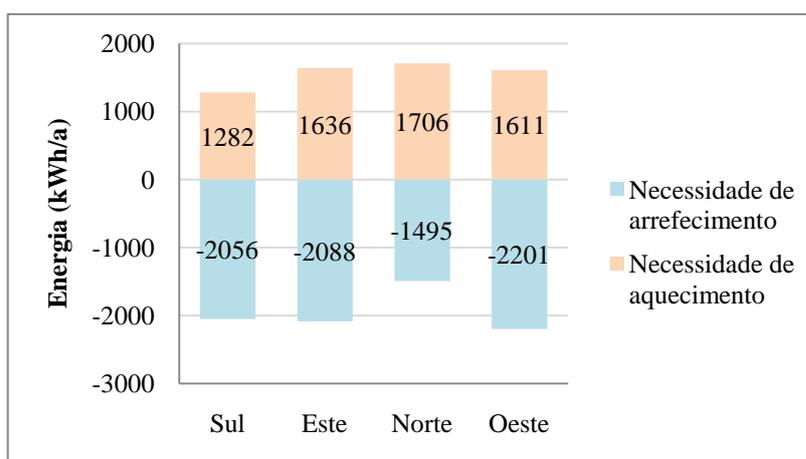


Figura 5.2 – Necessidades de aquecimento e arrefecimento para diferentes orientações da área maior de envidraçados em habitações em Gotemburgo (Persson et al., 2006)

Para uma área de pavimento de 120 m² e para uma janela original com um valor de área de 16% do valor da área de pavimento, como mostrado na figura 5.3, a redução da área de envidraçados orientada a Sul em 20% (Janela Pequena (-20%)) ou 50% (Janela Pequena (-50%)), não altera o valor da necessidade energética anual para o aquecimento, sendo que existe uma pequena variação no valor da necessidade energética anual para o arrefecimento. No caso de a maior parte da fachada orientada a Sul estar coberta com vidro (Janela Grande (+40%)), o valor da necessidade energética anual para o arrefecimento é maior, assim como o valor da necessidade energética anual para o aquecimento é maior. Foi, também, simulado, o caso extremo em que não existem envidraçados nas fachadas Norte e Sul (Sem Janelas). Observa-se que, este último caso, seria o mais eficiente tanto em termos de necessidade energética para o arrefecimento como para o aquecimento, mas esta situação seria irrealista. Sob o ponto de vista energético, o tamanho ideal das janelas devem estar entre o tamanho original e uma área reduzida de 50% (Persson et al., 2006).

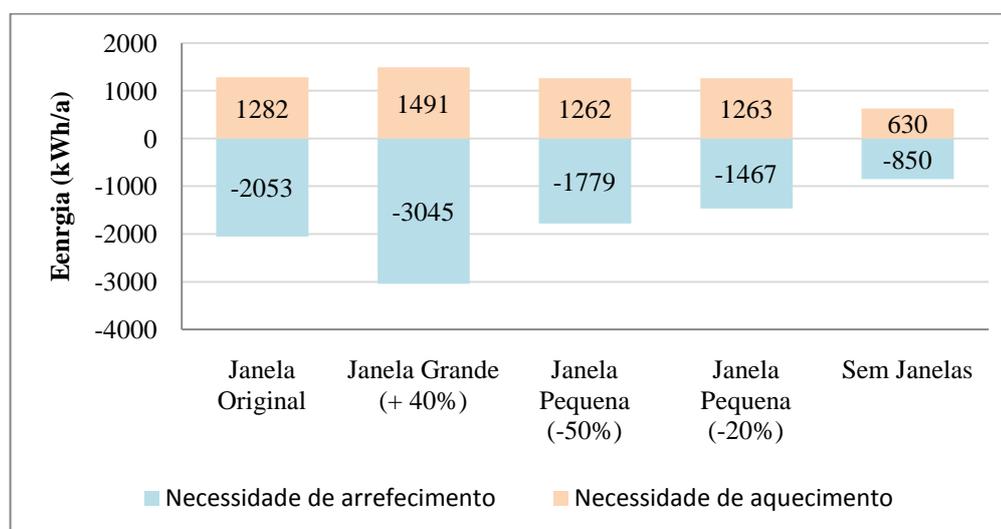


Figura 5.3 – Necessidades de aquecimento e arrefecimento para diferentes áreas de envidraçados em habitações em Gotemburgo (Persson et al., 2006)

5.2. Especificidades da Estanquidade

As contribuições típicas para as fugas de ar são: as ligações; o sistema de aquecimento/arrefecimento/ventilação e as aberturas na envolvente exterior, como portas, janelas e chaminé. Existem variados fatores responsáveis pelas fugas de ar pela envolvente do edifício. Não é fácil obter uma estimativa baseada somente na tipologia de construção (por exemplo, geometria, unifamiliares ou multifamiliares, com ou sem terraço), nos materiais de construção (por exemplo, betão, tijolos ou madeira), nos elementos de construção (por exemplo, portas e janelas, chaminés, tubos e dutos de sistemas), na idade ou no estado de manutenção/conservação. Para verificar a estanquidade de um edifício é útil e conveniente para realizar testes, uma vez que, quaisquer fluxos na envolvente do edifício podem ser detetados e corrigidos. A medição das fugas de ar através da envolvente do edifício é geralmente realizada por meio de um dos dois métodos padrão (Alfano et al, 2012):

- ✓ Teste Blower Door (BDT) – baseia-se na pressurização/despressurização mecânica da totalidade ou de uma parte do edifício para medir a taxa de fluxo de ar através da envolvente do edifício e a diferença de pressão interior-exterior;
- ✓ Diluição do gás de traçador - permite a avaliação da taxa de renovação do ar dos edifícios utilizando de três diferentes medições de concentração de gás: (i) o decaimento de concentração, (ii) a injeção constante, (iii) a concentração constante.

Em geral, o método de diluição do gás de traçador é mais preciso do que o BDT, mas é menos rentável e menos utilizado (Alfano et al, 2012). Assim, no presente documento somente são referidos resultados de análises experimentais realizadas por meio do método de BDT.

5.2.1. Teste Blower Door

O Blower Door é um ventilador especial instalado numa porta ou janela exterior, como é mostrado na figura 5.4. As restantes portas e janelas exteriores são fechadas e todas as portas interiores são abertas para que o edifício se comporte como um todo. Os sistemas de aquecimento com ingestão de ar interior, de ventilação mecânica e de ar condicionado são desligados. O ventilador aspira o ar para o exterior do edifício, gerando um vácuo com diferencial de pressão negativa de valor numérico igual a 50 Pa (despressurização ou pressurização). Este diferencial de pressão leva a um fluxo constante de ar através das fugas da envolvente do edifício. Os escoamentos de ar podem ser localizados através de uma mão ou de um medidor de fluxo. Em locais de difícil acesso, é utilizada uma câmara de infravermelhos. Uma série de medições durante a despressurização e pressurização, é gravada. Estas séries de medições fornecem o fluxo de ar a uma pressão diferencial de 50 Pa, a que é chamado fluxo de fuga e é representado por V_{50} (m^3/h). O V_{50} indica a quantidade de metros cúbicos de ar por hora que passam pelas frestas da envolvente. A taxa de renovação de ar, representada por n_{50} , é calculada a partir do quociente entre o fluxo de ar, V_{50} , e o volume interno do edifício concluído, V . Para que seja cumprida a norma PH, o valor deste parâmetro tem que ser inferior a $0,6 h^{-1}$.



Figura 5.4 – Equipamento do BDT instalado numa porta (PHI, 2014)

5.2.2. Análise Experimental de Testes de Pressurização e Despressurização

Uma investigação experimental foi realizada em 20 diferentes tipologias de edifícios residenciais, em Itália, sendo avaliados os seguintes parâmetros de influência na estanquidade: (i) área útil ($50-194 m^2$); (ii) área da envolvente do edifício ($137-498 m^2$); (iii) volume interno

(138-630 m³); (iv) tipologia de construção (casa de campo, casa com terraço, plana, grande edifício); (v) tipologia de caixilhos de janelas (ou seja, ferro, madeira, alumínio, com e sem selos) e (vi) ano de construção (de século XIX a 2008) e as condições de manutenção (Alfano et al, 2012).

Todos os testes foram realizados em conformidade com a ISO 9972 nas seguintes condições principais: (i) a velocidade do vento abaixo de 6 m/s; (ii) produto da temperatura do ar interior-exterior pela altura do edifício inferior a 500 mK e (iii) o volume total do edifício abaixo de 4000 m³. Em todos os edifícios, foram avaliados os seguintes índices de permeabilidade: taxa de renovação de ar – n_{50} ; permeabilidade ao ar – q_{a50} e taxa de vazamento específica – w_{50} . Foram, também, identificadas as causas e os efeitos destes fluxos de ar no conforto térmico, na QAI e no desempenho energético dos edifícios (Alfano et al, 2012).

Verificaram que o valor da taxa de renovação do ar experimental, n_{50} , varia 3,2 e 23,3 h⁻¹ e que o valor médio experimental igual a 7,3 h⁻¹. Verificaram que, para os edifícios com menor valor e valor médio de n_{50} são exibidos os valores mais elevados de permeabilidade na despressurização em vez de ser na pressurização. Este fato pode ser facilmente relacionado com a vedação insuficiente das janelas. Verificaram que o valor de n_{50} de edifícios construídos antes de 1980 é de duas vezes do valor exibido por edifícios recentes. Pelo contrário, os edifícios recentes apresentaram valores de n_{50} diminutos e taxas de ventilação inadequadas. Este fato ocorre devido ao uso de caixilhos herméticos que aumentam o conforto térmico, favorecem a poupança de energia, mas diminui a QAI por causa da falta de ventilação natural suficiente, tendo consequentes riscos para a saúde (Alfano et al, 2012).

Para verificar a influência da lareira, das janelas e dos sistemas de ventilação naturais sobre as fugas de ar foram realizados testes específicos num edifício típico italiano em conformidade com a norma ISO 9972. Verificaram que o valor da taxa de renovação do ar, n_{50} , nas condições em que a lareira está aberta é 33 % maior do que o valor nas condições em que a lareira está fechada, enquanto o valor nas condições em que a lareira está selada é 16% menor do que o valor nas condições em que a lareira está fechada. Relativamente ao teste de influência das janelas, verificaram que o valor de n_{50} nas condições em que as janelas são fechadas é 37,4% menor do que o valor nas condições em que as janelas são fechadas e seladas. Finalmente para a influência dos sistemas de ventilação naturais, o valor do fluxo de ar nas condições em sistemas de ventilação são selados é 38,8% menor do que o valor nas condições em sistemas de ventilação são abertos (Alfano et al, 2012).

Em suma, os ensaios experimentais realizados nos vinte edifícios residenciais italianos mostram que o valor da taxa de renovação do ar, n_{50} , é bastante alto, principalmente para os

edifícios construídos antes de 1980. As janelas e chaminé sem selamento e sistemas de ventilação naturais foram as causas mais importantes encontradas para o excesso de ventilação na construção (Alfano et al, 2012).

Na Bélgica (Ghent) foram realizados teste de pressurização num edifício PH. O edifício é uma moradia unifamiliar de três andares sem edifícios adjacentes. O valor do volume aquecido do edifício é 1083 m³, o valor da sua superfície exterior é de 630 m² e o valor da superfície de vãos envidraçados é de 90m². Deve notar-se que este edifício não contém chaminé nem claraboias. Além da finalidade estrutural, as placas funcionam barreira para-vapor. À data deste estudo, as consequências higrotérmicas do uso de uma barreira de ar exterior em climas frios e moderado estavam ainda pouco estudadas. Assim e por precaução, criou-se, além da barreira de ar exterior, uma barreira de ar tradicional interior vedando todas as juntas interiores. Para evitar perfurações nesta última zona para a instalação de serviços elétricos e hidráulicos, foi criado um ducto de 40 mm, preenchido com isolamento de fibras de linho e revestido, no interior, com gesso de celulose. A barreira de vento consiste em placas de fibra de asfalto impregnado de 18 mm de espessura. As placas têm uma camada impermeável especial composta por betume impregnado, na face exterior, que tem uma contribuição significativa para a estanquidade ao ar do material. No entanto, as placas têm uma elevada permeabilidade ao vapor, o que os torna aplicáveis como membranas de ar, do lado de fora do isolamento térmico. Na figura 5.5 está representada uma representação esquemática da envolvente do edifício (Langmans et al., 2010).

Normalmente, as juntas entre as placas de fibras exteriores não são seladas. No entanto, uma vez que, o foco deste estudo é a estanquidade da barreira de vento, todas as juntas nesta camada foram selados entre as diferentes medições. Isto permite avaliar o vazamento através das diferentes articulações e leva a uma estimativa do nível máximo de estanquidade exterior usando estas placas. Os testes de pressurização foram realizados durante as sucessivas fases de construção da barreira de vento do edifício acima descrito para investigar a importância dos diferentes percursos de fuga. Foram realizados 12 testes de acordo com a norma EN 13829. Foi efetuado um aumento progressivo da diferença de pressão dos 25 Pa até aos 70 Pa, em intervalos de 5 Pa, através da envolvente do edifício. Durante este aumento, foram medidos os valores da taxa de fluxo de ar e da diferença de pressão associada através da envolvente do edifício. Todos os testes foram realizados com o mesmo Blower Door e o valor da sua precisão é de mais ou menos 1%. O valor de fluxo de ar volumétrico é obtido através da medição da queda de pressão através de um orifício calibrado, sendo que este valor também é determinado com uma precisão de 1% (Langmans et al., 2010).

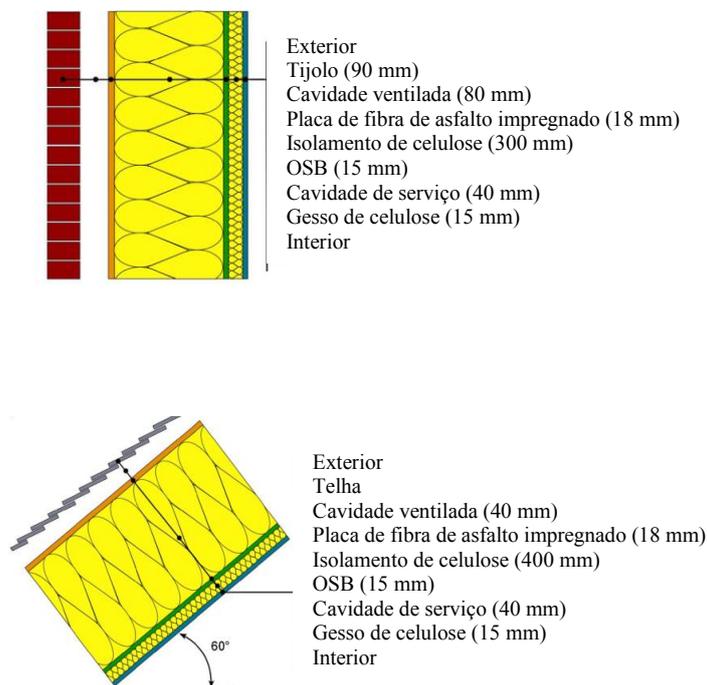


Figura 5.5 - Representação esquemática da envolvente do edifício. Em cima para a fachada e em baixo para a cobertura (Langmans et al., 2010)

Quando a primeira medição foi realizada, sete ligações fachada-janela já tinham sido seladas, pelo que não existe nenhum valor de medição sem nenhuma das juntas seladas. No entanto, este valor pode ser obtido a partir da medição de cada uma das sete ligações seladas e o valor medido com todas estas ligações seladas. Comparando as fases 1 a 3 do quadro 5.1, puderam concluir que a injeção com espuma de Poliuretano das ligações fachada-janela tem um grande impacto sobre a estanquidade total do edifício. A vedação externa das janelas à barreira de vento é muito trabalhosa e não contribui muito para a estanquidade ao ar do edifício. A razão para a obtenção deste resultado prende-se com o fato de que na altura da medição, a espuma de Poliuretano ter sido recentemente injetada, pelo que funcionou como uma barreira hermética. No entanto, quando a espuma secar, esta torna-se mais frágil e pode, com o tempo e devido a pequenos deslocamentos do edifício, fissurar, o que levaria a uma diminuição da estanquidade, justificando uma vedação extra em torno das janelas. Na fase 4, após a ligação da barreira de vento à fundação, a média do valor de n_{50} aumentou 17%. Este aumento inesperado pode ser atribuído às diferentes condições atmosféricas, a chuva e um maior valor de humidade podem influenciar a estanquidade da placa da barreira de vento. Seguidamente, foram seladas as ligações parede – parede e parede – cobertura. Esta etapa foi dividida em 3 fases (fase 5, 6 e 7). Pelos resultados do quadro 5.1, parece que esta selagem na etapa 6, não tem efeito. Este resultado pode ser explicado pelo fato de os remates das janelas e das portas

ter sido pregado temporariamente à barreira de vento, durante a construção. Com todas as ligações exteriores seladas (fase 9) foi medido um valor de n_{50} igual a $0,32 \text{ h}^{-1}$. Pondo a hipótese de que todas as ligações exteriores da barreira de vento estão perfeitamente seladas, o único caminho de fuga de ar é diretamente através da própria barreira de vento. Com base na estanquidade da barreira do vento e na superfície exterior do caso de estudo, o valor de n_{50} seria igual a $0,12 \text{ h}^{-1}$. É claro que, na prática, é muito pouco possível que a barreira de vento seja completamente selada. Através da diferença entre o valor teórico e o valor medido, podemos concluir que o valor das fugas inesperadas é de $212 \text{ m}^3/\text{h}$ (± 13) a 50 Pa. Este valor pode ser considerado pequeno, dado o tamanho do caso de estudo (Langmans et al., 2010).

Com a barreira de vento completamente selada, foi injetado o isolamento de fibras de celulose através dos orifícios interiores do OSB. O valor de n_{50} diminuiu de $0,32 \text{ h}^{-1}$ para $0,20 \text{ h}^{-1}$. As fugas de ar da envolvente de construção contêm três dimensões e a presença de isolamento aumenta o comprimento e sinuosidade dos percursos de fuga. Este fato resulta numa queda de pressão adicional na parede (Langmans et al., 2010).

Na fase 11 só alguns furos interiores foram selados. Deve-se notar que, no momento da medição, devido a razões de ordem prática em alguns dos quartos nas juntas macho-fêmea entre a OSB foram já seladas. O teste final foi realizado alguns meses depois do que o teste anterior. Nesse momento, todas as ligações do interior estavam seladas. O valor final de n_{50} desta casa passiva foi de $0,14 \text{ h}^{-1}$ (Langmans et al., 2010).

Quadro 5.1 - Resultados da estanquidade do edifício para as diferentes fases de construção (Langmans et al., 2010)

Fase	Descrição da fase	OP	UP	Média
Exterior				
1	Barreira de vento instalada	3,38	3,37	3,38
2	Ligações fachada-porta e fachada-janela injetadas com espuma de Poliuretano	0,98	0,94	0,96
3	Janelas seladas com a barreira de vento	1,04	0,94	0,99
4	Barreira de vento ligada à fundação		1,16	1,16
5	Ligações de canto seladas (todas, exceto 11 m de ligação fachada-cobertura)		0,79	0,79
6	Fachadas norte, este e sul seladas		0,83	0,83
7	Ligações de canto que faltavam ser seladas na fase 5		0,67	0,67
8	Sem melhorias desenvolvidas	0,46	0,46	0,46
9	Fachada este e cobertura seladas	0,30	0,33	0,32
Interior				
10	Isolamento de fibras de celulose injetado	0,20	0,20	0,20
11	Furos interiores selados	0,17	0,17	0,17
12	Teste final	0,14	0,14	0,14

Em suma, as ligações parede-parede e parede-telhado parecem obter os resultados mais significativos. Verificou-se que somente por meio de selagem destas ligações, o valor n_{50} diminui em $0,5 \text{ h}^{-1}$, neste caso de estudo. Com todas as ligações seladas, foi obtido um valor de n_{50} de $0,32 \text{ h}^{-1}$ a 50 Pa, valor que se enquadra com o valor padrão da PH ($0,6 \text{ h}^{-1}$ a 50 Pa). O valor n_{50} final, com o revestimento interior selado, foi de $0,14 \text{ h}^{-1}$ (Langmans et al., 2010).

Os valores dos resultados das fugas mais significativos na barreira de vento são apresentados no quadro 5.2. As fugas através das ligações de canto e a ligação macho-fêmea são deduzidas a partir da correspondente ensaios *in situ*, tendo em consideração o comprimento das juntas. Para a fuga através das ligações de canto, ambas as medições foram realizadas sob as mesmas condições do tempo. Por conseguinte, a fuga deduzida não é influenciada pelo teor de humidade da barreira de vento. O vazamento através da ligação macho-fêmea é calculado a partir das medições das fases 5 e 9. Existe uma pequena diferença entre as condições meteorológicas, o que pode levar a uma subestimação do vazamento correspondente. Selar todas as ligações macho-fêmea é muito mais demorado do que selar todas as outras ligações (Langmans et al., 2010).

Quadro 5.2 – Fluxo de ar através das diferentes ligações (Langmans et al., 2010)

	$V_{50} \text{ (m}^3/\text{h)}$	Fluxo a 50 Pa ($\text{m}^3/(\text{h.m})$)
Ligação de canto (90°)	243	3,1
Ligação de canto (30°)	330	15,7
Ligação macho-fêmea	342	0,4

Além do teste de pressurização *in situ*, realizado em todo o edifício, foram efetuadas medições laboratoriais em amostras da barreira do vento, incluindo as ligações mais significativas. Foram concebidos dois testes para investigar a estanquidade ao ar ao nível do material e da montagem (Langmans et al., 2010).

O primeiro teste consistiu numa caixa de estrutura metálica aberta de um lado para ensaiar amostras com um tamanho de $0,27 \text{ m}$ por $0,27 \text{ m}$. Nesta caixa caracteriza-se a permeância ao ar dos materiais e da ligação fêmea-macho. Num segundo aparelho, com o mesmo princípio, são ensaiadas amostras de maiores dimensões ($0,85 \text{ m}$ por $0,95 \text{ m}$) e detalhes de construção em 3D. Esta caixa é utilizada para testar as ligações de canto entre os painéis de fibras com um ângulo de 90° (ligação parede - parede) e 30° (ligação parede - telhado). Para além das placas de fibras asfalto impregnado utilizadas (AIFa), o mesmo material foi também testado (AIFb) sem uma camada exterior (Langmans et al., 2010).

Após a instalação da amostra na caixa, foi criada uma sob pressão na caixa e o fluxo de ar passa através da amostra. Com um aumento gradual da diferença de pressão através da amostra, foi possível obter os resultados da medição da taxa de fluxo de ar em função da diferença de pressão (Langmans et al., 2010).

O valor da permeabilidade ao ar de uma ligação, K_{joint} ($m^3 \cdot m^{-1} \cdot h^{-1} \cdot Pa^{-1}$), é dado pela expressão (Langmans et al., 2010):

$$K_{joint} = \frac{(K_{spec} - K_{mat}) \times A_{spec}}{l_{joint}} \quad (1)$$

onde K_{spec} é permeabilidade ao ar da amostra; A_{spec} é a área da amostra; l_{joint} é o comprimento da ligação da amostra e K_{mat} é permeabilidade ao ar do material, em $m^3 \cdot m^{-2} \cdot h^{-1} \cdot Pa^{-1}$ (conhecido a partir do ensaio).

Todos os resultados seguintes para a permeabilidade estão assentes na equação (1) para determinar a permeabilidade de 50 Pa. Isto permite uma comparação direta com as medidas de campo do estudo de caso e é denotado por “50 “ em índice. O valor do fluxo para o ensaio com a caixa de menores dimensões foi estimado em 0,0035 m^3/h a 50 Pa. Para o outro ensaio foi estimado um valor de fluxo igual a 9,94 m^3/h a 50 Pa (Langmans et al., 2010).

Puderam concluir que o material AIF se torna 20 vezes mais permeável sem essa camada exterior. Além disso, esta tabela mostra que a placa de fibras de asfalto impregnado (AIFa) é 5 vezes mais permeável ao ar do que o OSB utilizado. Constatou-se também que a permeabilidade da ligação macho - fêmea entre as placas do AIF e o OSB são da mesma ordem de grandeza, quando perfeitamente instalados. Quando o espaçamento entre as placas aumenta devido ao mau acabamento, isto influencia mais significativamente o OSB. Além disso, as ligações de canto da barreira de vento dependem ainda mais a qualidade de execução. A permeabilidade do ar pode variar de acordo com um fator até 20 dependendo do espaçamento entre as placas (Langmans et al., 2010).

Comparando os resultados das medições de laboratório com os resultados das medições de campo e verifica-se o grau de precisão o valor n_{50} podem ser previstas a partir de testes laboratoriais. No quadro 5.3, os valores obtidos *in situ* para a permeabilidade ao ar do painel de fibras de asfalto impregnado ($g_{50,house} = 0,6 m^3 \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}$) são deduzidos tendo em conta que todas as ligações da barreira de vento foram seladas. A partir da comparação com os testes laboratoriais, observa-se que este valor é demasiado elevado. Esse fato pode ocorrer devido a percursos de fuga imprevistos correspondentes ao valor de 212 m^3/h (± 13) a 50 Pa. Estes percursos de fuga não selados não influenciam a quantificação das ligações estudadas, uma

vez que, estas fugas são eliminadas usando a técnica de vedação redutora. Os valores de g medidos *in situ* através das ligações de canto encontram-se entre os valores limites superior e inferior determinados em laboratório. No entanto, é muito difícil prever o valor real do vazamento a partir de testes de laboratório uma vez que o intervalo entre o limite superior e inferior é muito grande (Langmans et al., 2010).

Quadro 5.3 – Comparação entre o fluxo em condições de laboratório e *in situ* (Langmans et al., 2010)

	Medições <i>in situ</i>		Medições em laboratório	
	$g_{50, in situ}$ ($m^3 \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}$)	$V_{50, in situ}$ (m^3/h)	$g_{50, lab}$ ($m^3 \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}$)	$V_{50, lab}$ (m^3/h)
AIF	0,6	341	0,19 – 0,26	102 – 196
Ligação macho-fêmea AIF	0,4	342	0,47 – 1,30	465 - 1287
Ligação de canto (90°)	3,1	243	0,63 – 11,09	49 – 865
Ligação de canto (90°)	15,7	330	13,51 – 37,75	284 – 793

Numa comparação direta dos resultados obtidos *in situ* com os obtidos em laboratório conduz à conclusão de que os testes de laboratório são apenas adequados para predizer o limite inferior da estanqueidade geral dos edifícios. As fugas de ar dependem muito da perfeição da mão-de-obra. Por conseguinte, a incerteza sobre o valor de vazamento torna-se muito grande para obter um valor de n_{50} fiável para edifícios a partir de sua soma. Por outro lado, deve notar-se que as medições laboratoriais de permeabilidade ao ar são úteis para comparar diferentes técnicas de solução (Langmans et al., 2010).

5.3. Ventilação

5.3.1.A Ventilação e a Saúde

As baixas taxas de ventilação podem resultar num aumento da concentração de poluentes gerados no interior, que podem estar associados com o conforto (qualidade do ar interior), os efeitos na saúde (inflamação, infeções, asma, alergia) e a produtividade. Existem alguns estudos conclusivos sobre a ventilação residencial e sua associação com os efeitos na saúde em grupos vulneráveis (crianças e idosos). Em dois estudos nórdicos, na Noruega e na Suécia, a taxa de ventilação é superior a 0,5 renovações de ar por hora, não tendo sido encontrada uma associação direta entre as taxas de ventilação dos edifícios em estudo e sintomas de asma e alergias em crianças que habitavam esses edifícios. Num outro estudo sueco com uma amostra de 11000 crianças (uma parte com doenças respiratórias e as restantes saudáveis), os resultados mostraram que os sintomas alérgicos foram relacionados com ventilação e não foi encontrada associação entre a taxa de ventilação e o diagnóstico médico de asma, em

contraste com os estudos anteriores. Os resultados de um estudo realizado em Paris com uma amostra de 96 indivíduos com idade entre 60 e 95 anos apontam que o principal risco para problemas de saúde é a ventilação inadequada (por exemplo, aberturas de ar bloqueadas e janelas fechadas), o que aumenta a concentração de poluentes interiores. Estes riscos são amplificados por ignorância ou negligência sobre os perigos de poluentes interiores e ventilação inadequada (Dimitroulopoulou, 2012).

A ventilação adequada é importante para reduzir a humidade do ar interior. A humidade do ar interior aumenta o risco de humidade nas habitações e a infestação das mesmas com ácaros. O excesso de humidade em materiais interiores leva ao crescimento microbiano, ou seja, bolor, fungos e bactérias, que, subsequentemente, libertam compostos microbianos orgânicos voláteis para o ar interior. Pelos resultados obtidos num estudo realizado no Reino Unido foi concluído que a recuperação de calor melhora a humidade relativa interior (Dimitroulopoulou, 2012).

Resumidamente, as janelas e a envolvente do edifício mais herméticas reduzem a troca de ar, por infiltração. Se não forem instalados sistemas de ventilação mecânica ou os ocupantes não ventilem suficientemente a habitação através da abertura das janelas, existem problemas com a qualidade do ar interior. Além disso, existe um aumento da humidade relativa do ar. As taxas de ventilação reduzidas levam a crescimento de fungos nas componentes insuficientemente isoladas da envolvente do edifício e, especialmente, sobre pontes térmicas na envolvente. Um sistema de ventilação mecânica equilibrado é necessário para fornecer ar de acordo com os requisitos de qualidade do ar interior, tipicamente $0,3-0,4 \text{ h}^{-1}$. Além disso, a fim de manter as perdas de ventilação e, conseqüentemente, a procura de calor dos espaços, o calor tem de ser recuperado por um sistema de recuperação de calor eficiente (eficiência mínima de 75%) (Feist et al., 2005).

5.3.2. Taxas de Ventilação

As taxas de ventilação são determinadas de acordo com as exigências de QAI. São baseadas nos valores das taxas de fluxo de ar exterior por pessoa na ordem de 5 a 10 l/s, correspondendo a taxas de renovação do ar de cerca de 0,3 a 0,6 h^{-1} . De um modo geral, a QAI aumenta com o aumento das taxas de fluxo. A humidade relativa do ar abaixo de 30% é susceptível de causar desconforto e deve ser evitado. A humidade relativa do ar interior depende da humidade absoluta do ar exterior, da taxa de troca de ar, da temperatura interior e da produção de humidade interior. Para casos com baixa humidade do ar exterior, com pouca produção de humidade interior e com baixa densidade ocupacional, a humidade relativa do ar interior pode ser inferior a 30%. Geralmente, isso é provável de ocorrer com taxas de ventilação superiores a 0,4 h^{-1} (Feist et al., 2005).

As diretrizes PH recomendam uma taxa de fluxo de abastecimento de $30 \text{ m}^3/\text{h}$ por pessoa. O número de pessoas estimado multiplicado por este fluxo é igual ao valor total de fornecimento de fluxo de ar. A taxa de fluxo total de fornecimento tem de ser equilibrada com a taxa total de fluxo de extrato. O sistema também deve permitir uma configuração mínima de fornecimento de ar para tempos sem ocupação, com uma taxa correspondente de valor igual a $0,2 \text{ h}^{-1}$ (Feist et al., 2005).

As condições de ventilação das habitações em vários países europeus têm sido alvo de estudo. Nesta secção vão ser apresentados os resultados relativos a dois estudos realizados em Portugal. Neste estudo foram medidas e analisadas as taxas de ventilação em sete apartamentos semelhantes de um edifício de apartamentos com quatro andares. Seis desses apartamentos tinham ventilação mista (ventilador contínuo impulsionado sistema de exaustão da cozinha e exaustão natural no WC) e um apartamento ventilado de forma natural (para efeito de comparação). Foram realizadas medições no verão (agosto de 2005) e no inverno (janeiro/fevereiro de 2006) com os apartamentos desocupados. Os resultados demonstram que os apartamentos com o sistema de ventilação misto apresentam maiores valores para as taxas médias de ventilação do que o apartamento com ventilação natural. O valor destas taxas varia com a localização em altura e com a orientação. Os valores das taxas de ventilação médios para o verão são de $0,65 \text{ h}^{-1}$ e de $0,51 \text{ h}^{-1}$ e para o inverno de $0,81 \text{ h}^{-1}$ e $0,63 \text{ h}^{-1}$, respetivamente para os apartamentos com sistema de ventilação misto e ventilação natural (Dimitroulopoulou, 2012).

5.3.3. Estudo de Simulação de Taxas Mínimas de Ventilação

Um estudo de modelação foi realizado com o objetivo de investigar o impacto da regulamentação sobre alterações das taxas mínimas de ventilação em habitações em 15 países desenvolvidos, em todo o mundo. As taxas mínimas de ventilação para cada país foram aplicadas a uma casa modelo proposta pelo Instituto de Arquitetura do Japão. O modelo tinha uma área de $125,9 \text{ m}^2$ e um volume de $302,1 \text{ m}^3$ e é ocupada por uma família com duas crianças. A estimativa das taxas de fluxo de ar mínimas, para a habitação do modelo japonês, após a aplicação dos regulamentos para a Suécia, Finlândia, Dinamarca, Itália e Grécia foi de $0,5 \text{ h}^{-1}$, no caso dos regulamentos da Noruega e da França foi de $0,7 \text{ h}^{-1}$, enquanto que para a Alemanha e a Suíça foram de $0,6 \text{ h}^{-1}$ e $0,4 \text{ h}^{-1}$, respetivamente. Estes resultados mostram que uma grande percentagem das habitações, especialmente no Norte da Europa, está sob ventilada com taxas de ventilação abaixo de $0,5 \text{ h}^{-1}$. As mudanças na prática conduzem à construção altamente isolada e a estruturas estanques, tendo uma expectativa de um maior uso de sistemas de ventilação mecânica com recuperação de calor. Existem riscos associados à

qualidade do ar em declínio, mas também oportunidade de melhoria, desde que medidas adequadas sejam adotadas (Dimitroulopoulou, 2012).

5.3.4. Sistemas de Ventilação com Recuperação de Calor

O traçado do sistema de ventilação deve ser projetado em conjunto com o projeto do edifício e numa fase inicial. O espaço necessário para o equipamento de ventilação e, especialmente, para as condutas deve ser tido em conta. A disposição das divisões influencia o comprimento do sistema de condutas e a possibilidade de realizar a ventilação por determinados sistemas (Feist et al., 2005).

O princípio deste sistema de ventilação é o de o ar exterior ser insuflado nos quartos e salas de estar (divisões com elevada ocupação e/ou baixos níveis de poluentes) e extraído do wc e da cozinha (com baixa ocupação e/ou altos níveis de emissão de poluentes), tendo o fluxo de ar no interior da habitação uma direção bem definida. Na figura 4 é apresentado um exemplo de distribuição de ar com base neste princípio (Feist et al., 2005).

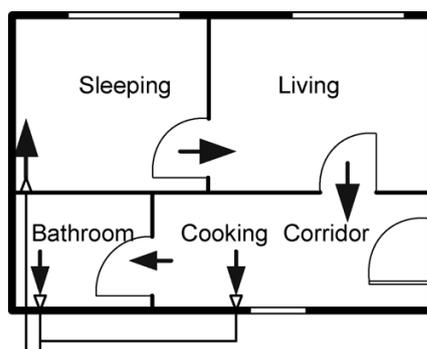


Figura 5.7 - Exemplo de uma distribuição do sistema de ventilação mecânica com recuperação de calor numa habitação unifamiliar (Feist et al., 2005)

Os dispositivos de transferência de ar têm como função fornecer e extrair os fluxos de ar. Esta transferência pode ser feita através de um intervalo de 1 a 2 cm abaixo (ou acima) da folha da porta é suficiente para passar de cerca de 40 m³/h para uma queda de pressão de 1 Pa. Em alternativa, podem ser utilizadas grelhas na folha de porta desde que não interfiram com outros requisitos de conforto. Os dutos de ar devem ser curtos e retos. As secções transversais das condutas devem ser escolhidas de modo que a velocidade do ar não seja maior do que 3 m/s. O sistema de condutas deve ser acessível para limpeza e os filtros devem ser utilizados, em qualquer caso, para evitar a deposição de pó. Os filtros devem ser trocados regularmente, para evitar quedas de pressão e por razões de higiene. Os exaustores da cozinha devem ser preferencialmente operados em modo de recirculação sem conexão direta com o sistema de

ventilação. Um filtro de alta qualidade na capa é capaz de reter gordura de forma eficiente. O permutador térmico permite a recuperação de calor do ar que é extraído e o aquecimento do ar que vem do exterior e que vai ser fornecido. A eficiência líquida da recuperação de calor necessária para uma PH tem que ser de pelo menos 75%. Uma alta eficiência fornece de ar com temperaturas próximas do nível de conforto (Feist et al., 2005).

5.4. AQUECIMENTO DO AR

Existe alguma reserva, por parte dos habitantes, em aquecer a sua habitação através do aquecimento do ar, uma vez que, estão acostumados a ter uma “fonte de calor” materializada numa superfície quente. Não só os utilizadores como os projetistas de sistemas de ventilação, tinham algumas dúvidas sobre o nível de conforto térmico e a distribuição de ar que este tipo de aquecimento proporciona. Em 2005, a EMPA terminou um projeto que visou reunir e analisar o conhecimento sobre os sistemas de aquecimento de ar em PH e completar o conhecimento relativamente aos fluxos de ar, ao conforto térmico e aos fogões a lenha como fonte de calor suplementar (Feist et al., 2005).

O calor fornecimento pelo ar aquecido juntamente com os ganhos internos e solares têm que compensar as perdas de calor por transmissão, infiltração e ventilação. Uma parte do calor emitido para as divisões entra pela transferência de calor entre o ar da divisão e o invólucro das condutas. Pelos requisitos de QAI, a taxa de fluxo de ar é limitada ao valor de 10 W/ m², sendo que se o valor da carga de aquecimento exceder este limite, é necessário existir recirculação de ar ou um sistema de aquecimento adicional para a alimentação na energia de pico. Nas PH, o valor da carga máxima de aquecimento não pode ser só calculado com base na temperatura, uma vez que, este valor, também, é dependente dos ganhos solares (clima, área e sombreamento de vãos envidraçados). Assim, a carga de aquecimento deve ser avaliada para dois tipos de situações no inverno: 1) dias moderadamente frios com céu nublado; 2) dias moderadamente frios, claros e ensolarados (Feist et al., 2005).

Nas condições críticas de funcionamento tem relevância não só avaliar o grau de desconforto como o tempo de ocorrência desses incidentes. Foi determinado por simulação (TRNSYS), usando um modelo simplificado de uma habitação multifamiliar segundo o conceito *Passive House*. Normalmente, o ATD é colocado por cima da porta que separa a divisão do corredor. Esta configuração foi avaliada no teste de câmara de fluxo de ar na sala de EMPA, como o demonstrado na figura 5.8 (Feist et al., 2005).

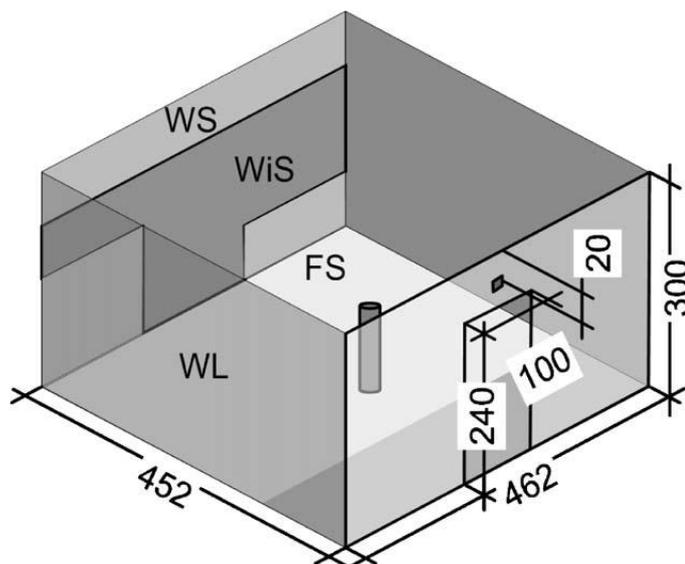


Figura 5.8 - Configuração da sala de EMPA avaliada no teste de câmara de fluxo de ar.

Foram utilizados dois tipos de ATD diferentes para o abastecimento de ar: bocal com largura de fenda ajustável e grelha simples sem ajustes. Foi colocado no centro da sala um cilindro aquecido para simular o efeito de uma pessoa. Uma abertura abaixo e acima da folha da porta serviu para a extração. Foram testados 4 casos diferentes de abastecimento: (i) ar abastecido pelo bocal e com uma temperatura de 40°C; (ii) ar abastecido pela grelha e com uma temperatura de 40°C; (iii) ar abastecido pelo bocal e com uma temperatura de 16°C; (iv) ar abastecido pela grelha e com uma temperatura de 16°C (Feist et al., 2005).

Para a temperatura de 40 °C do ar de alimentação, para ambos os ATDS de abastecimento, o fornecimento de ar espalha-se uniformemente entre a altura ATD e do teto. O ar atingiu a parede externa diretamente abaixo do teto e depois, afundando lentamente, fluiu de volta para a soleira superior da porta. Para a temperatura de 16 °C do ar de alimentação, com o bocal, o ar atingiu primeiro o teto, mas logo em seguida caiu (cerca de 1,5 a 2 m de distância da fonte de ATD). Com a grelha, o ar difundiu-se ao longo do chão e, em seguida, levantou-se lentamente ao longo das paredes. A posição da abertura de extração não teve efeitos visíveis no padrão de fluxo. Na figura 5.9 apresenta-se a visualização dos diferentes casos (Feist et al., 2005).

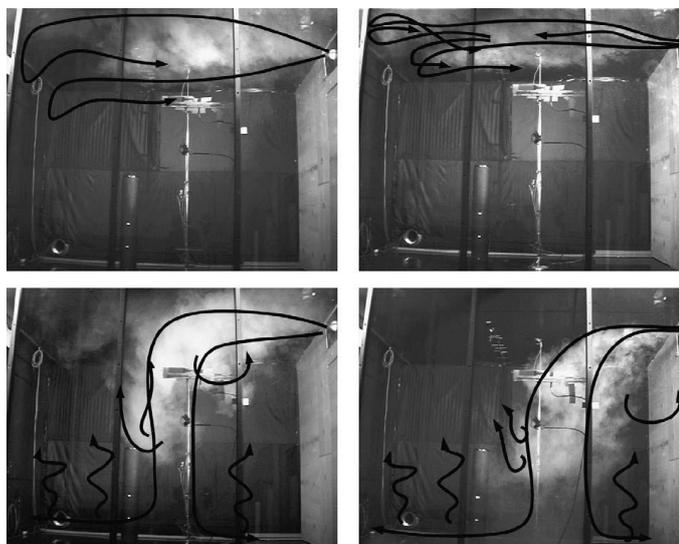


Figura 5.9 – Visualização do fluxo de ar para as diferentes situações. Do lado esquerdo para bocal e do lado direito para a grelha. Em cima para a temperatura de 40 °C e em baixo para a temperatura de 16 °C. (Feist et al., 2005)

As medições na sala da câmara de teste provaram que ambos ATD de abastecimento garantem um conforto térmico muito bom e uma boa eficiência para a troca de ar tanto para a diferença de temperaturas positivas como para a negativas. Como o bocal e para baixas temperaturas, o conforto é melhor. No caso do aquecimento, a eficiência de troca de ar é apenas ligeiramente mais elevada quando o ar extraído é transferido através de uma abertura por baixo da porta (Feist et al., 2005).

É recomendada a utilização de ATD de abastecimento ajustáveis para facilitar o ajustamento da rede. Se ATD de abastecimento e o de extração estão colocados em lados opostos da divisão, devem ser colocados com um desnível, se possível (Feist et al., 2005).

Assim, para diferentes geometrias da divisão, diferentes ATD, diferentes taxas de ventilação e diferentes temperaturas do ar de abastecimento, foram determinados os valores da eficiência de troca de ar entre 0,45 e 0,57. A falta de conforto térmico não foi encontrada em qualquer uma das configurações analisadas (Feist et al., 2005).

5.5. Superaquecimento

Facilmente, num edifício PH, podem ser atingidas temperaturas interiores muito elevadas, especialmente se esse edifício se localizar numa região onde os verões e/ou outonos sejam muito quentes, como por exemplo na Eslovénia. Nos dias quentes de verão, o edifício é

exposto a uma extensa radiação solar e a temperaturas externas elevadas. A exposição à extensa radiação solar provoca a entrada de energia e a exposição a temperaturas externas elevadas não deixa que exista transferência de temperatura entre o interior e o exterior, não existindo assim libertação de energia. Consequentemente, qualquer pequena entrada de energia pode ter um grande efeito sobre a temperatura interna. Inevitavelmente, a baixa capacidade interna de calor e o aumento dos ganhos internos, incluindo o que surgem como consequência da atividade e do metabolismo dos residentes, conduzem ao superaquecimento e à redução do conforto térmico no verão (Malkar e Strancar, 2011).

De acordo com vários estudos, a abordagem mais simples para libertar o excesso de calor da casa envolve a ventilação (abertura de janelas) durante a noite, quando o valor da temperatura ambiente é mais baixo do que o valor da temperatura interna. Alguns desses estudos apontam para a ventilação mecânica equilibrada como o fator mais importante para sobreaquecimento de edifícios bem isolados. Também identificaram sobreaquecimento como uma questão importante em casas passivas, especialmente no sul do clima da Europa. Além disso, um estudo mostrou que, num clima quente e húmido como o de Israel, é possível alcançar uma redução de 3 a 6 °C num edifício, sem recurso a um aparelho de ar condicionado, apenas através da otimização da quantidade de massa térmica, da taxa de ventilação noturna e da diferença de temperatura entre o dia e a noite (Malkar e Strancar, 2011).

Ao projetar um edifício parâmetros, como tamanho e orientação de janelas, elementos de construção, sistema de ventilação, devem ser considerados e avaliados em relação ao balanço de energia do edifício. A proteção solar, o ganho solar, a massa térmica, o isolamento térmico, os ganhos de calor internos, o resfriamento noturno, a taxa de ventilação e as propriedades dos vidros são, obviamente, os fatores importantes que influenciam os fenómenos de superaquecimento (Malkar e Strancar, 2011).

Num estudo de Malkar e Strancar, foi feita a tentativa de explicar quantitativamente as dependências reais de temperatura de edifícios passivos durante os períodos quentes de verão. O objetivo deste estudo foi determinar a resposta geral do edifício e determinar em que medida a temperatura interna pode aumentar, se os moradores não aplicarem estratégias simples para o arrefecimento do edifício, nomeadamente abrindo as janelas à noite, e o sombreamento das janelas apropriado. Foi realizado tendo em conta os dados recolhidos num edifício PH localizado no norte da Eslovénia, onde o inverno é frio e o verão é quente. Os dados de inverno foram analisados para parametrizar a eficiência do isolamento, a massa térmica e os ganhos internos médios, enquanto os dados de verão foram utilizados para caracterizar do problema de superaquecimento (Malkar e Strancar, 2011).

Assim, num modelo relativamente simples de fluxo de energia numa PH permitiu parametrizar a resposta geral do edifício, permitindo explicar as dependências da temperatura interna nos meses quentes de verão. O efeito do sombreamento e resfriamento noturno por ventilação através de janelas abertas foram examinados. Neste contexto, o problema de sobreaquecimento foi examinado (Malkar e Strancar, 2011).

Os resultados mostram que as estratégias simples numa PH como sombreamento rigoroso durante o dia e ventilação excessiva através de janelas abertas durante a noite pode manter as temperaturas internas dentro do nível de conforto durante períodos quentes num clima continental quente do norte da Eslovénia. Não aplicar estas duas estratégias levaria a um sobreaquecimento extremo (Malkar e Strancar, 2011).

Isto prova que o conceito PH pode ser aplicado também nos climas com meses extremamente quentes e extremamente frios, mas os moradores dessas habitações devem ser instruídos de forma a manterem o ambiente confortável nos meses quentes de verão com estas estratégias simples (Malkar e Strancar, 2011).

6. MODELOS DE SIMULAÇÃO ENERGÉTICA

Para efetuar o cálculo do balanço energético pode-se utilizar modelações dinâmicas, mensal ou sazonais. Este cálculo, normalmente, é efetuado por um dos três modelos.

O *Passive House Planning Package* (PHPP) é um programa em Excel com folhas para a introdução de dados do edifício, balanços de energia de aquecimento, balanços de energia de arrefecimento, necessidade de energia primária e necessidade de energia elétrica. Foi criado em 1988 com vista a simplificar o projeto de edifícios segundo o conceito *Passive House*. Tem sido continuamente desenvolvidas e validadas novas versões do programa com base em resultados de novos projetos de investigação. (Badescu et al, 2010)

Existem outros modelos de simulação, como são o caso do PHTT e o TNRSYS. O PHTT é um modelo dinâmico complexo desenvolvido para avaliar a carga térmica de um edifício de escritórios construído segundo o conceito PH. Até 2010, para este tipo de programa não existia um processo de acreditação internacional, sendo que foi feito um grande esforço para verificar as previsões do programa dentro de vários estudos de validação. Já o TNRSYS é um dos programas mais populares e testados de energia renovável e avalia a carga térmica do edifício. Foi usado no projeto Primasens PH (Alemanha) como referência para o PHTT para a estação de aquecimento sob as mesmas condições em ambos. (Badescu et al, 2010)

O PHTT e o TNRSYS apresentam resultados semelhantes, que geralmente subestimam as cargas de construção térmicas obtidas a partir de medições, durante o período de aquecimento. Comparando o PHTT com o PHPP, pode-se constatar que o PHTT prevê uma necessidade de aquecimento anual de 8,2% e 4,3% menor do que os métodos mensal e anual do PHPP, respetivamente. Estima que o valor da necessidade de aquecimento obtido através do PHTT é mais baixo do que o valor obtido pelo PHPP nos meses de inverno, uma vez que, no PHPP não são considerados os efeitos de acumulação de calor no edifício. (Badescu et al, 2011)

7. METODOLOGIAS DE CÁLCULO DO BALANÇO ENERGÉTICO

7.1.PHPP

O cálculo das necessidades de energia pode ser efetuado por um dos seguintes métodos: “annual method” – método anual; “monthly method” – método mensal. No primeiro é usada uma estimativa anual dos dados climáticos durante o período de aquecimento. No segundo é determinada uma soma de estimativas mensais durante o período de aquecimento. Os métodos proporcionam resultados ligeiramente diferentes. O método mensal produz resultados mais precisos. A vantagem principal do método anual é que o cálculo é especialmente claro e fácil de compreender, mas, para certos tipos de construção, pode produzir resultados que são muito baixos. Por estas razões, foi utilizado o método mensal para o cálculo das necessidades de energia para o aquecimento.

7.1.1.Cálculo das Necessidades de Energia para o Aquecimento

O limite para as necessidades anuais específicas para aquecimento, q_H , para edifícios PH é:

$$q_H \leq 15 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \text{ a}) \quad (2)$$

Este valor é aplicado ao total do edifício que se encontra dentro da envolvente térmica.

O valor da necessidade anual específica para aquecimento, q_H , é calculado através da expressão:

$$q_H = \frac{Q_H}{A_{TFA}} [\text{kWh}/\text{m}^2 \cdot \text{ano}] \quad (3)$$

sendo q_H a necessidade anual específica para o aquecimento, Q_H a necessidade anual para o aquecimento e A_{TFA} a área útil.

O valor da necessidade anual para o aquecimento, Q_H , é dado pela diferença entre as perdas e os ganhos e é expressado por:

$$Q_H = Q_L - Q_G [\text{kWh}/ \text{ano}] \quad (4)$$

sendo Q_L o valor das perdas totais de calor e Q_G o valor dos ganhos de calor úteis.

O valor dos ganhos de calor úteis, Q_G , é dado pela seguinte expressão:

$$Q_G = Q_F \times \eta_G [\text{kWh}/ \text{ano}] \quad (5)$$

sendo Q_F o valor dos ganhos de calor e η_G o valor do fator de utilização dos ganhos de calor. O fator de utilização dos ganhos de calor, η_G , é definido como a fração dos ganhos de calor

que pode ser usada para o aquecimento. O calor excedente, por exemplo excesso de ganhos solar, não é ou é parcialmente utilizável. O valor deste fator é calculado usando a seguinte fórmula:

$$\eta_G = \frac{1-(Q_F/Q_L)^5}{1-(Q_F/Q_L)^6} \quad (6)$$

O valor dos ganhos de calor, Q_F , é calculado pela soma as fontes de calor interno com os ganhos de solares durante o período de aquecimento. É dado pela expressão:

$$Q_F = Q_I + Q_S \text{ [kWh/ ano]} \quad (7)$$

sendo Q_I o valor dos ganhos de calor interno e Q_S o valor dos ganhos solares.

Os ganhos de calor interno são definidos pela soma do calor gerado por pessoas e eletrodomésticos durante o período de aquecimento. A energia necessária para o aquecimento de água fria e evaporação de água deve ser deduzido ao valor total de ganhos de calor interno. Os ganhos de calor interno são estimados para as condições de vida padrão e introduzido um valor padrão: 2,1 W/m² por área útil para edifícios unifamiliares, edifícios multifamiliares e edifícios geminados; 4,1 W/m² por área útil para centros de apoio social; 3,5 W/m² por área útil para edifícios de escritórios e serviços administrativos; 2,8 W/m² por área útil para escolas. O valor dos ganhos de calor interno é dado pela expressão:

$$Q_I = 0,024 \times \text{Duração do período de aquecimento} \times q_I \times A_{TFA} \text{ [kWh/ ano]} \quad (8)$$

sendo q_I a potência específica e A_{TFA} a área útil.

O valor dos ganhos solares é calculado pela seguinte fórmula:

$$Q_S = r \times g \times A_W \times G \text{ [kWh/ ano]} \quad (9)$$

sendo r o fator de redução, g o coeficiente de transmissão de energia solar, A_W a área do vão envidraçado e G a radiação total durante o período de aquecimento. O fator de redução tem em conta a razão entre a área de vão envidraçado e o caixilho, o sombreamento, a sujidade dos vãos envidraçados e o ângulo de inclinação da radiação através das janelas. Os vãos envidraçados de uma PH não devem ter sombreamento e ter uma baixa razão entre a área de vão envidraçado e o caixilho. A radiação total é dependente da geometria dos vãos envidraçados, do desvio angular dos vãos envidraçados em relação ao Norte, do ângulo de inclinação dos vãos envidraçados e da região climática onde se localiza o edifício em estudo.

O valor das perdas totais de calor, Q_L , é obtido pela soma do valor das perdas de calor por transmissão com o valor das perdas de calor por ventilação. Pode ser expresso pela expressão:

$$Q_L = Q_T + Q_V \text{ [kWh/ ano]} \quad (10)$$

sendo Q_T o valor das perdas de calor por transmissão e Q_V o valor das perdas de calor por ventilação.

O valor das perdas por ventilação pode ser calculado usando a seguinte expressão:

$$Q_V = n_V \times V_V \times c \times G_t \text{ [kWh/ ano]} \quad (11)$$

sendo n_V o valor da taxa de troca de ar energeticamente eficaz, V_V o valor do volume de referência do sistema de ventilação, c o valor da capacidade térmica específica do ar e G_t o valor do índice graus horas de aquecimento. O valor da capacidade térmica específica do ar é igual a $0,33 \text{ Wh/(m}^3\text{K)}$. O valor do volume de referência do sistema de ventilação, V_V , é dado pela multiplicação da área útil, A_{TFA} , pelo pé-direito médio do edifício em estudo. O valor da taxa de troca de ar energeticamente eficaz com recuperação de calor, n_V , é calculado através da expressão:

$$n_V = n_{V,system} \times (1 - \Phi_{HR}) + n_{V,Res} \text{ [kWh/ ano]} \quad (12)$$

sendo $n_{V,system}$ o valor da taxa média de troca de ar através do sistema de ventilação, $n_{V,Res}$ o valor da taxa de renovação de ar por infiltração e Φ_{HR} o valor da eficiência total da recuperação de calor do sistema de recuperação de calor. O valor padrão da taxa média de troca de ar através do sistema de ventilação, $n_{V,system}$, é igual a $0,4 \text{ h}^{-1}$ para edifícios de habitação. O valor O valor padrão da taxa média de troca de ar através do sistema de ventilação, $n_{V,Res}$, é igual a $0,042 \text{ h}^{-1}$. Este valor corresponde ao resultado do teste de pressurização (blower door test) com uma taxa de troca de ar igual a $0,6 \text{ h}^{-1}$ e uma pressão de 50 Pa . O valor da eficiência total da recuperação de calor do sistema de recuperação de calor, Φ_{HR} , é calculado através da seguinte expressão:

$$\Phi_{HR} = 1 - (1 - \eta_{eff}) \times (1 - \eta_{SHX}) \text{ [kWh/ ano]} \quad (13)$$

sendo η_{eff} o valor da eficiência da recuperação de calor do sistema de recuperação de calor e η_{SHX} o valor da eficiência do permutador de calor com subsolo. O valor da eficiência da recuperação de calor do sistema de recuperação de calor tem em conta as perdas de calor dos tubos entre a unidade de recuperação de calor e a envolvente exterior do edifício.

O valor das perdas de calor por transmissão, Q_T , pode ser calculado, para cada elemento da construção pertencente à envolvente opaca exterior, pela seguinte expressão:

$$Q_T = A \times U \times f_T \times G_t \text{ [kWh/ ano]} \quad (14)$$

sendo A o valor da área de cada elemento da envolvente opaca exterior, U o valor do coeficiente de transmissão térmica de elemento da envolvente opaca exterior, f_T o valor do

fator de redução da diferença de temperatura e G_t o valor do índice graus horas de aquecimento.

7.2.REH

O REH estabelece os requisitos para os edifícios de habitação, novos ou sujeitos a intervenções, bem como os parâmetros e metodologias de caracterização do desempenho energético, em condições nominais, de todos os edifícios de habitação e dos seus sistemas técnicos, no sentido de promover a melhoria do respetivo comportamento térmico, a eficiência dos seus sistemas técnicos e a minimização do risco de ocorrência de condensações superficiais nos elementos da envolvente.

É aplicado ao projeto e construção de novos edifícios destinados a habitação; a edifícios existentes destinados a habitação, onde ocorreu uma grande intervenção na envolvente ou nos sistemas técnicos e na avaliação energética dos edifícios novos, sujeitos a grande intervenção e existentes, no âmbito do SCE. A sua aplicação deve ser verificada para a totalidade do edifício, no caso de edifícios de habitação unifamiliares. No caso de edifícios de habitação multifamiliares, a aplicação deve ser verificada para cada fração constituída ou, em edifícios em projeto ou em construção, para cada fração prevista constituir. Já no caso de edifícios mistos, deve ser verificada a aplicação para as frações destinadas a habitação, independentemente da aplicação do RECS às restantes frações. Por grande intervenção entende-se a intervenção em edifício que não resulte na edificação de novos corpos e em que se verifique que: (i) o custo da obra relacionada com a envolvente ou com os sistemas técnicos preexistentes seja superior a 25% do valor da totalidade do edifício, compreendido, quando haja frações, como o conjunto destas, com exclusão do valor do terreno em que este está implantado; ou (ii) tratando-se de ampliação, o custo da parte ampliada exceda em 25% o valor do edifício existente respeitante à totalidade do edifício, devendo ser considerado, para determinação do valor do edifício, o preço da construção da habitação por metro quadrado fixado anualmente, para as diferentes zonas do País, pela portaria a que se refere o artigo 4.º do Decreto-Lei n.º 329 -A/2000, de 22 de dezembro. Por envolvente entende-se o conjunto de elementos de construção do edifício ou fração, compreendendo as paredes, pavimentos, coberturas e vãos, que separam o espaço interior útil do ambiente exterior, dos edifícios ou frações adjacentes, dos espaços não úteis e do solo. Entende-se por sistema técnico, o conjunto dos equipamentos associados ao processo de climatização, incluindo o aquecimento, arrefecimento e ventilação natural, mecânica ou híbrida, a preparação de AQS a produção de energia renovável. Por fim, entende-se por fração, a unidade mínima de um edifício, com saída própria para uma parte de uso comum ou para a via pública, independentemente da constituição de propriedade horizontal. (REH, 2013)

7.2.1. CÁLCULO DAS NECESSIDADES DE ENERGIA PARA O AQUECIMENTO

O limite para as necessidades anuais específicas para aquecimento para edifícios segundo o REH é dado por:

$$N_{ic} < N_i \quad (15)$$

O valor de N_i é o valor máximo para as necessidades nominais anuais de energia útil para aquecimento, considerando valores e condições de referência e obtido a partir da seguinte expressão:

$$N_i = (Q_{tr,i,ref} + Q_{ve,i,ref} - Q_{gu,i,ref}) / A_p \quad [\text{kWh}/\text{m}^2 \cdot \text{ano}] \quad (16)$$

sendo $Q_{tr,i,ref}$ a transferência de calor por transmissão através da envolvente de referência na estação de aquecimento (kWh); $Q_{ve,i,ref}$ a transferência de calor por ventilação de referência na estação de aquecimento (kWh); $Q_{gu,i,ref}$ os ganhos de calor úteis na estação de aquecimento (kWh) e A_p a área interior útil de pavimento do edifício medida pelo interior (m^2).

O valor de $Q_{tr,i,ref}$ deve ser obtido considerando (i) coeficientes de transmissão térmica superficial de referência (U_{ref}) para elementos opacos e envidraçados previstos na Tabela I.01 do REH, em função do tipo de elemento da envolvente e da zona climática; (ii) coeficientes de transmissão térmica linear (Ψ_{ref}) indicados na Tabela I.02 do REH, em função do tipo de ligação entre elementos da envolvente do edifício; (iii) área de vãos até 20% da área interior útil de pavimento do edifício, devendo a eventual área excedente ser somada à área de envolvente opaca exterior, sendo que para ambos os tipos de elementos devem ser usados os respetivos referidos na alínea (i).

O valor de $Q_{ve,i,ref}$ deve ser obtido considerando uma taxa de renovação de ar de referência ($R_{ph,ref}$) igual à taxa de renovação para o edifício em estudo, até um máximo de 0,6 renovações por hora.

No cálculo dos valores de $Q_{gu,i,ref}$ deve ser considerado (i) ganhos térmicos associados ao aproveitamento da radiação solar e internos e (ii) fator de utilização dos ganhos térmicos na estação de aquecimento de referência unitário ($\eta_{ref} = 0,6$).

O valor de N_{ic} é o valor das necessidades nominais anuais de energia útil para aquecimento do edifício e é calculado pela expressão seguinte:

$$N_{ic} = (Q_{tr,i} + Q_{ve,i} - Q_{gu,i}) / A_p \quad [\text{kWh}/\text{m}^2 \cdot \text{ano}] \quad (17)$$

sendo $Q_{tr,i}$ a transferência de calor por transmissão através da envolvente na estação de

aquecimento (kWh); $Q_{ve,i}$ a transferência de calor por ventilação na estação de aquecimento (kWh); $Q_{gu,i}$ os ganhos térmicos úteis na estação de aquecimento resultantes dos ganhos solares através dos vãos envidraçados, da iluminação, dos equipamentos e dos ocupantes (kWh) e A_p a área interior útil de pavimento do edifício medida pelo interior (m^2).

A transferência de calor por transmissão global, que ocorre através da envolvente, traduz-se em perdas de calor calculadas de acordo com a seguinte expressão:

$$Q_{tr,i} = 0,024 \times GD \times H_{tr,i} \text{ [kWh]} \quad (18)$$

sendo GD o número de graus-dias de aquecimento especificados para cada região NUTS III, [$^{\circ}C.dia$] e $H_{tr,i}$ o coeficiente global de transferência de calor por transmissão [$W/^{\circ}C$].

O cálculo do coeficiente global de transferência de calor por transmissão resulta da soma de quatro parcelas:

$$H_{tr,i} = H_{ext} + H_{enu} + H_{adj} + H_{ecs} \text{ [W/^{\circ}C]} \quad (19)$$

sendo $H_{tr,i}$ o coeficiente de transferência de calor através de elementos da envolvente em contacto com o exterior [$W/^{\circ}C$]; H_{enu} o coeficiente de transferência de calor através de elementos da envolvente em contacto com espaços não úteis [$W/^{\circ}C$]; H_{adj} o coeficiente de transferência de calor através de elementos da envolvente em contacto com edifícios adjacentes [$W/^{\circ}C$] e H_{ecs} o coeficiente de transferência de calor através de elementos da envolvente em contacto com o solo [$W/^{\circ}C$].

O coeficiente de transferência de calor por transmissão através da envolvente exterior calcula-se de acordo com a seguinte expressão:

$$H_{ext} = \sum_i [U_i \times A_i] + \sum_j [\psi_j \times B_j] \text{ [W/^{\circ}C]} \quad (20)$$

onde U_i é o coeficiente de transmissão térmica do elemento da envolvente i [$W/(m^2.^{\circ}C)$]; A_i é a área do elemento da envolvente i , medida pelo interior do edifício [m^2]; ψ_j é o coeficiente de transmissão térmica linear da ponte térmica linear j [$W/(m.^{\circ}C)$] e B_j é o desenvolvimento linear da ponte térmica linear j , medido pelo interior do edifício [m].

Os coeficientes de transferência de calor por transmissão através da envolvente em contacto com espaços não úteis, H_{enu} , e em contacto com edifícios adjacentes, H_{adj} , calculam-se ambos de acordo com a seguinte expressão:

$$H_{enu,adj} = b_{tr} \times (\sum_i [U_i \times A_i] + \sum_j [\psi_j \times B_j]) \text{ [W/^{\circ}C]} \quad (21)$$

onde b_{tr} é o coeficiente de redução de perdas de determinado espaço não útil ou de um

edifício adjacente. Um coeficiente de redução de perdas $b_{tr} \leq 1$, traduz a redução da transmissão de calor nas situações em que a temperatura do espaço não útil ou do edifício adjacente está compreendida entre a temperatura interior de referência do espaço interior útil e a temperatura exterior.

O cálculo do coeficiente de transferência de calor por transmissão através de elementos em contacto com o solo pode ser feito através da seguinte expressão:

$$H_{ecs} = \sum_i [U_{bf\ i} \times A_i] + \sum_j [Z_j \times P_j \times U_{bw\ j}] \quad [W/^\circ C] \quad (22)$$

onde $U_{bf\ i}$ é o coeficiente de transmissão térmica do pavimento enterrado i [$W/(m^2 \cdot ^\circ C)$]; A_i é a área do pavimento em contacto com o solo i , medida pelo interior do edifício [m^2]; Z_j é a profundidade enterrada da parede em contacto com o solo j [m]; P_j é o desenvolvimento total da parede em contacto com o solo j , medido pelo interior do edifício [m] e $U_{bw\ j}$ é o coeficiente de transmissão térmica da parede em contacto com o solo j [$W/(m^2 \cdot ^\circ C)$].

As perdas de calor por ventilação correspondentes à renovação do ar interior durante a estação de aquecimento são calculadas de acordo com a equação:

$$Q_{ve,i} = 0,024 \times GD \times H_{ve,i} \quad [kWh] \quad (23)$$

sendo $H_{ve,i}$ o coeficiente global de transferência de calor por ventilação na estação de aquecimento.

O valor de $H_{ve,i}$ é dado pela expressão:

$$H_{ve,i} = 0,34 \times R_{ph,i} \times A_p \times P_d \quad [W/^\circ C] \quad (24)$$

sendo $R_{ph,i}$, a taxa nominal de renovação do ar interior na estação de aquecimento, [h^{-1}]; A_p a área interior útil de pavimento, medida pelo interior, [m^2] e P_d o pé direito médio da fração.

No caso de a ventilação ser assegurada por meios providos de dispositivos de recuperação de calor do ar extraído, a energia necessária relativa às perdas que ocorrem por ventilação é dada pela seguinte expressão:

$$Q_{ve,i} = 0,024 \times GD \times b_{ve,i} \times 0,34 \times R_{ph,i} \times A_p \times P_d \quad [kWh] \quad (25)$$

sendo $b_{ve,i}$ o fator de correção da temperatura tendo em conta o sistema de recuperação de calor, que se calcula de acordo com a seguinte expressão:

$$b_{ve,i} = 1 - \eta_{RC} \times \frac{V_{ins}}{R_{ph,i} \times A_p \times P_d} \quad (26)$$

onde η_{RC} é o rendimento do sistema de recuperação de calor e V_{ins} é o valor médio diário do

caudal de ar insuflado através do sistema de recuperação de calor, [m³/h].

A conversão da parte dos ganhos térmicos brutos que se traduzem em ganhos térmicos úteis faz-se de acordo com a seguinte expressão:

$$Q_{gu,i} = \eta_i \times Q_{g,i} \text{ [kWh]} \quad (27)$$

onde η_i é o fator de utilização dos ganhos térmicos na estação de aquecimento e $Q_{g,i}$ é o valor dos ganhos térmicos brutos na estação de aquecimento [kWh].

O valor de $Q_{g,i}$ é obtido através da seguinte expressão:

$$Q_{g,i} = Q_{int,i} + Q_{sol,i} \text{ [kWh]} \quad (28)$$

sendo $Q_{int,i}$ os ganhos térmicos associados a fontes internas de calor, na estação de aquecimento [kWh] e $Q_{sol,i}$ os ganhos térmicos associados ao aproveitamento da radiação solar pelos vãos envidraçados, na estação de aquecimento [kWh].

Os ganhos térmicos internos, $Q_{int,i}$, são calculados, durante toda a estação de aquecimento, de acordo com a seguinte equação:

$$Q_{int,i} = 0,72 \times q_{int} \times M \times A_p \text{ [kWh]} \quad (29)$$

onde q_{int} são os ganhos térmicos internos médios por unidade de superfície, iguais a 4 W/m²; M é a duração média da estação convencional de aquecimento [mês] e A_p é a área interior útil de pavimento, medida pelo interior, [m²].

O cálculo dos ganhos solares brutos através dos vãos envidraçados, $Q_{sol,i}$, na estação de aquecimento, deve ser efetuado de acordo com a seguinte equação:

$$Q_{sol,i} = G_{Sul} \times \sum_i [X_j \times \sum_m F_{s,inj} \times A_{s,inj}] \times M \text{ [kWh]} \quad (30)$$

sendo G_{Sul} o valor médio mensal de energia solar média incidente numa superfície vertical orientada a Sul, durante a estação de aquecimento, por unidade de superfície [kWh/m².mês]; X_j o

fator de orientação para as diferentes exposições de acordo com a Tabela 01; $F_{s,inj}$ o fator de obstrução do vão envidraçado n com orientação j na estação de aquecimento; $A_{s,inj}$ a área efetiva coletora de radiação solar do vão envidraçado n na superfície com a orientação j [m²]; M a duração média da estação convencional de aquecimento [mês]; j o índice que corresponde a cada uma das orientações e n o índice que corresponde a cada uma das superfícies com a orientação j .

As superfícies serão consideradas horizontais quando apresentarem inclinação inferior a 60° face ao plano horizontal, sendo as restantes consideradas verticais. Para o cálculo da área efetiva coletora das superfícies verticais e para cada uma das orientações, efetua-se o somatório das áreas coletoras situadas nesse octante.

O valor de área efetiva coletora $A_{s,i}$ deve ser calculado vão a vão, de acordo com a seguinte expressão:

$$A_{s,i} = A_w \times F_g \times g_i \text{ [m}^2\text{]} \quad (31)$$

onde A_w é a área total do vão envidraçado, incluindo o vidro e caixilho [m²]; F_g é a fração envidraçada do vão envidraçado e g_i é o fator solar de inverno. Nas situações em que não existam quaisquer dispositivos de sombreamento, o fator solar será igual ao fator solar do vidro para uma incidência solar normal, afetado do fator de seletividade angular, mediante a expressão $g_i = F_{w,i} \times g_{s,vi}$. Nas situações de vão envidraçados interiores, ou seja, vãos incluídos na envolvente interior (*int*), adjacente a um espaço não útil (*enu*) que possua vãos envidraçados, designadamente marquises, estufas, átrios, ou similares, e em alternativa ao indicado acima, a área efetiva coletora deve ser determinada de acordo com a seguinte expressão:

$$A_{s,inj} = (A_w)_{int} \times (F_g)_{int} \times (F_g)_{enu} \times (g_i)_{int} \times (g_i)_{enu} \text{ [m}^2\text{]} \quad (32)$$

onde $(A_w)_{int}$ é a área total do vão envidraçado interior, incluindo o vidro e caixilho [m²]; $(F_g)_{int}$ é a fração envidraçada do vão envidraçado interior; $(F_g)_{enu}$ é a fração envidraçada do vão envidraçado do espaço não útil; $(g_i)_{int}$ é o fator solar na estação de aquecimento, do vão envidraçado do espaço não útil e $(g_i)_{enu}$ é o fator solar na estação de aquecimento, do vão envidraçado do espaço não útil.

No fator solar de ambos os vãos envidraçados, interior e do espaço não útil, não deverão ser considerados os dispositivos de proteção solar móveis, devendo para este efeito considerar-se apenas dispositivos de proteção solar quando os mesmos forem permanentes $g_i = g_{TP}$. g_{TP} é o fator solar global do vão envidraçado com todos os dispositivos de proteção solar permanentes existentes. A determinação do fator de obstrução da superfície, $F_{s,inj}$, para um vão envidraçado interior, é realizada admitindo que os elementos opacos do espaço não útil causam sombreamento no vão envidraçado interior.

8. AVALIAÇÃO DAS VARIÁVEIS

8.1. DESCRIÇÃO DO EDIFÍCIO EM ESTUDO

O edifício em estudo é representativo de uma moradia unifamiliar constituída por um piso, admitindo-se que se situa no interior da zona urbana de Lisboa, a uma altitude de 50 m e a uma distância da costa superior a 5 Km. Para esta localização, no caso de REH, o valor do parâmetro graus-dias, GD, é de 971; a zona climática de inverno é I_1 ; o valor da temperatura média exterior de é de 11°C e a duração da estação de aquecimento é de 5,1 meses. Já para o PHPP, a duração da estação de aquecimento é de 59 d/a, o valor de G_t é de 13 kWh/a para o pavimento e de 27 kWh/a para a restante envolvente exterior.

A laje de pavimento do edifício encontra-se em contato com o ar exterior. O valor da área útil de pavimento é igual a 100 m^2 e o valor do pé direito médio é de 2,70 m. Assumiu-se que o edifício é de Classe de Inércia Térmica média e de tipologia T3. As figuras 8.1 permitem uma visualização do edifício, de uma forma genérica.

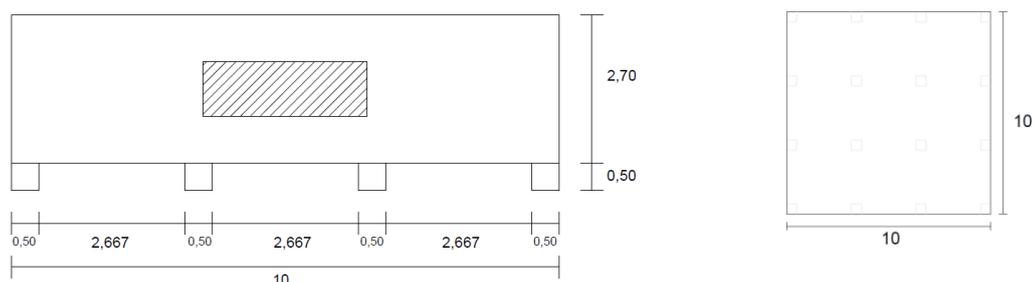


Figura 8.1 - Vista lateral do edifício (lado esquerdo da figura) e planta do edifício (lado direito da figura). Dimensões pelo exterior em metros.

As fachadas do edifício são de cor clara, não ventiladas, orientadas a norte, este, sul e oeste, com uma área de valor igual a 27 m^2 e um valor de coeficiente de transmissão térmica igual a $0,50\text{ W}/(\text{m}^2\cdot^{\circ}\text{C})$. O pavimento exterior tem uma área de valor igual a 100 m^2 e um valor de coeficiente de transmissão térmica igual a $0,40\text{ W}/(\text{m}^2\cdot^{\circ}\text{C})$. A cobertura exterior é de cor clara, tem uma área de valor igual a 100 m^2 e um valor de coeficiente de transmissão térmica igual a $0,40\text{ W}/(\text{m}^2\cdot^{\circ}\text{C})$. Os valores utilizados para o coeficiente de transmissão térmica de todos os elementos da envolvente opaca exterior são os valores de referência referidos na Tabela I.01 do REH, para uma zona climática I_1 .

No edifício existem apenas vãos envidraçados na envolvente vertical opaca exterior orientados nas direções norte, oeste, sul e este. Cada vão tem uma área de valor igual a 3 m^2 e o valor de coeficiente de transmissão térmica dia-noite igual a $2,90\text{ W}/(\text{m}^2\cdot^{\circ}\text{C})$. São constituídos por vidro duplo. A 5 cm da extremidade superior de cada vão existe uma pala

horizontal com 0,5 m de comprimento, pelo que o valor do ângulo da para a pala horizontal, α , é de 23° . Considerou-se que existe um obstáculo em frente de todas as fachadas do edifício com uma altura de 9 metros e uma distância de 7 metros, sendo o valor do ângulo de obstrução do horizonte, α_h , é de 43° . A classe de permeabilidade ao ar do caixilho dos vãos envidraçados é classe 4. O valor da fração envidraçada, F_g , é o valor de referência referido na Tabela 20 do REH para um caixilho em alumínio ou aço sem quadrícula. Quanto ao valor do fator solar do vidro, g_{bvi} , é o valor de referência referido na Tabela 12 do REH para um vidro duplo incolor de 4 mm a 8 mm + incolor de 4 mm a 8 mm. O valor do fator solar global com proteções permanentes e móveis, g_{bT} , é o valor de referência referido na Tabela 13 do REH para uma proteção interior constituída por cortinas transparentes. Pela cláusula 2 do ponto 7.1 do REH e, uma vez que, não existem dispositivos de proteção solar permanentes, o valor do fator solar global com proteções permanentes, g_{bTp} , é igual ao valor do fator solar do vidro g_{bvi} . Os valores de F_g , de g_{bvi} , de g_{bT} e de g_{bTp} são apresentados no quadro 8.1.

Quadro 8.1 – Valores de F_g , de g_{bvi} , de g_{bT} e de g_{bTp} .

Fração Envidraçada F_g	Fator Solar do vidro g_{bvi}	FS Global Prot. Perm. e móveis g_{bT}	FS Global Prot. Perm. g_{bTp}
0,7	0,78	0,38	0,78

O valor do coeficiente de transmissão térmica linear de cada uma das ligações entre elementos é o valor de referência referido na Tabela I.02 do REH. No quadro 8.2 apresentam-se os valores dos comprimentos (B) e dos coeficientes de transmissão térmica linear (Ψ) de cada uma das ligações entre elementos.

Quadro 8.2 - valores dos comprimentos e dos coeficientes de transmissão térmica linear de cada uma das ligações entre elementos

Tipo de ligação entre elementos	B (m)	Ψ (W/(m.°C))
Fachada com pavimento sobre exterior	40	0,50
Fachada com cobertura	40	0,50
Duas paredes vertical em ângulo saliente	10,80	0,40
Fachada com caixilharia	28	0,20

8.2.AVALIAÇÃO DO EDIFÍCIO DE REFERÊNCIA DO REH

Uma fração de referência do REH não considera obrigatória a recuperação de calor no sistema de ventilação mecânica, existindo um requisito mínimo para R_{ph} de valor igual a $0,4 \text{ h}^{-1}$. O requisito energético associado à ventilação impõe que o valor de R_{ph} esteja num intervalo

entre $0,4 \text{ h}^{-1}$ e $0,6 \text{ h}^{-1}$ sem obrigar a qualquer tipo de recuperação de calor do ar ao contrário do que acontece no PH. Para que seja possível a comparação entre as duas metodologias, a fração de referencia do REH tem incluir um sistema de ventilação de recuperação de calor.

8.3.Avaliação da Eficiência do Sistema de Ventilação Mecânica com Recuperação de Calor

No PH é imposto a obrigatoriedade de recuperação de calor no ar do sistema de ventilação, sendo nesta seção, apresentados e discutidos os resultados da avaliação da importância da eficiência desse sistema. Em (Feist et al., 2005), é recomendado um valor mínimo para a eficiência de um sistema ventilação mecânica com recuperação de calor numa PH de 75%. Assim sendo, efetuam-se duas simulações do mesmo edifício, em que na primeira simulação o valor da eficiência do sistema de ventilação é o valor anteriormente referido e na segunda simulação o valor da eficiência do sistema de ventilação é de 92%. Ambos os sistemas estão incluídos na base de dados do PHPP. Para ambos os sistemas, o valor $R_{ph,i}$ é de $0,44 \text{ h}^{-1}$ e o valor de W_{vm} é de $315,4 \text{ kWh}$, ambos os valores calculados pela ferramenta Aplicação LNEC – Ventilação REH desenvolvida pelo LNEC. O valor do caudal médio diário insuflado, em ambas as situações, é de $120 \text{ m}^3/\text{h}$.

Como é verificável pelo quadro 8.3, os valores obtidos para as perdas, os ganhos e a necessidade de energia de aquecimento na primeira simulação são da mesma ordem de grandeza em ambos os métodos. Atendendo aos resultados obtidos para $Q_{tr,i}$ na primeira simulação, verifica-se que, apesar de o valor de G_t ser muito diferente de $0,024 \times GD$ e no PHPP o valor de U e Ψ que entram na equação de $Q_{tr,i}$ serem médias ponderadas com a área e com o comprimento, respetivamente, o valor de $Q_{tr,i}$ é muito semelhante. Para o valor de $Q_{ve,i}$, a diferença entre os métodos é sobretudo pelo facto de o PHPP ter em conta não só a taxa de renovação de ar média como a taxa de infiltração. No cálculo do valor de $Q_{int,i}$, as diferenças entre as metodologias residem no facto de o valor de q_{int} no PHPP ser metade do valor no REH e no facto de no PHPP o período de aquecimento ser maior que no REH. Apesar de o valor global da radiação e o fator de redução no cálculo de $Q_{sol,i}$ terem valores muito diferentes em ambos os métodos e de no PHPP se ter em conta os ganhos solares através da envolvente opaca exterior, verifica-se para a primeira simulação que o valor de $Q_{sol,i}$ no PHPP é menor que no REH. Apesar do valor dos ganhos brutos ser um pouco diferente, o valor dos ganhos úteis é muito semelhante em ambos os métodos. Isto acontece, porque o valor do fator de utilização é mais baixo no REH, onde o valor de $Q_{g,i}$ é mais elevado, acabando por existir uma compensação. Comparando o valor de N_{ic} , na primeira simulação para ambos os métodos, verifica-se que este valor é muito próximo.

Comparando os resultados obtidos, apresentados no quadro 8.3, para as duas simulações, verifica-se um aumento muito pouco expressivo do valor de $Q_{tr,i}$ no PHPP. Este aumento prende-se com o facto de o valor de G_t aumentar, uma vez que, este parâmetro se ajusta automaticamente sempre que considere que existe mais ou menos resistência à passagem de fluxo de ar do interior para o exterior. Verifica-se, também e como era esperado, que com o aumento do valor da eficiência do sistema de ventilação, o valor de $Q_{ve,i}$ diminuiu significativamente. Verifica-se que essa diminuição é substancialmente maior no REH que no PHPP. Apesar de nas duas simulações e em ambos os métodos, os valores de $Q_{g,i}$ serem iguais, o valor de $Q_{gu,i}$ é menor na simulação em que o sistema tem uma eficiência de 92%, uma vez que, existe uma quase insignificante variação do valor do fator de utilização. Verifica-se uma pouco significativa diminuição do valor de N_{ic} em ambos os métodos e para as duas simulações.

Quadro 8.3 – Resultados obtidos para a avaliação da eficiência do sistema de ventilação com recuperação de calor

Simulação		 75%	 92%	Δ (%)
$Q_{tr,i}$ (KWh/ano)	REH	4956	4956	0
	PHPP	4971	4999	+ 0,6
$Q_{ve,i}$ (KWh/ano)	REH	228	67	- 70,6
	PHPP	276	140	- 49,3
$Q_{int,i}$ (KWh/ano)	REH	1475	1475	0
	PHPP	1068	1068	0
$Q_{sol,i}$ (KWh/ano)	REH	1341	1341	0
	PHPP	1322	1322	0
$Q_{g,i}$ (KWh/ano)	REH	2817	2817	0
	PHPP	2391	2391	0
$Q_{gu,i}$ (KWh/ano)	REH	2293	2272	- 0,9
	PHPP	2232	2228	- 0,2
N_{ic} (KWh/(m ² .ano))	REH	29	28	- 3,4
	PHPP	30	29	- 3,3
N_i (KWh/(m ² .ano))	REH	47	47	
	PHPP	15	15	

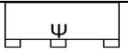
Pode concluir-se que o aumento do valor da eficiência do sistema de ventilação tem uma enorme importância no valor das perdas por ventilação e sobretudo no REH. Apesar desta tão significativa importância, esta não se reflete no valor de N_{ic} em que existiu uma pouco expressiva diminuição. Pelo que se pode concluir que o aumento do valor da eficiência do sistema de ventilação tem uma pouca importância na diminuição do valor de N_{ic} . Para ambas as simulações, no REH, o valor de N_{ic} é menor que o valor de N_i , pelo que cumpre o REH. Ao contrário do que acontece para o PHPP, em que o valor de N_{ic} é maior que o valor de N_i , pelo

que nenhum dos edifícios cumpre o requisito do PH para o aquecimento. Uma vez que, o sistema de ventilação com eficiência de 92% é uma melhor solução, a partir deste ponto todos os edifícios estudados têm este valor de eficiência do sistema de ventilação.

8.4. Avaliação da Influência das Pontes Térmicas Lineares nos Resultados

Nesta seção é avaliada a importância das pontes térmicas lineares. Para tal ser avaliado, é feita uma simulação do edifício com o sistema de ventilação com recuperação de calor com eficiência de 92% e onde se modificam os valores de Ψ para todas as ligações entre elementos. Os valores de Ψ são modificados com base nos valores deste parâmetro apresentados no catálogo de pontes térmicas lineares disponível online na página oficial do ITeCons, de acordo com o apresentado no quadro 8. 4.

Quadro 8.4 – Valores de Ψ para cada uma das ligações entre elementos

Simulação	Ligação entre elementos							
	Fachada com pav. sobre exterior		Fachada com cobertura		Duas paredes vertic. em ângulo saliente		Fachada com caixilharia	
	B (m)	Ψ (W/(m.°C))	B (m)	Ψ (W/(m.°C))	B (m)	Ψ (W/(m.°C))	B (m)	Ψ (W/(m.°C))
	40	0,5	40	0,5	10,80	0,40	28	0,20
		0,29		0,28		0,19		0,06

Os resultados apresentados no quadro 8.5 relativos à simulação do edifício com o sistema de ventilação com recuperação de calor com eficiência de 92% são os resultados apresentados no quadro 8.3. Comparando os resultados obtidos, apresentados no quadro 8.5 para as duas simulações, verifica-se que com a diminuição do valor do coeficiente de transmissão térmica linear, o valor de $Q_{tr,i}$ diminui-se, como era expectável. Verifica-se que essa diminuição é ligeiramente maior no REH que no PHPP. Verifica-se, também, um aumento muito pouco expressivo do valor de $Q_{ve,i}$ no PHPP. Este aumento prende-se, novamente, com o facto de o valor de G_t aumentar, uma vez que, este parâmetro se ajusta automaticamente sempre que considere que existe mais ou menos resistência à passagem de fluxo de ar do interior para o exterior. Apesar de nas duas simulações e em ambos os métodos, os valores de $Q_{g,i}$ serem iguais, o valor de $Q_{gu,i}$ é menor na simulação em que os valores de Ψ são menores, uma vez que, existe uma muito pouco expressiva variação do valor do fator de utilização sobretudo no REH. Verifica-se uma significativa diminuição do valor de N_{ic} em ambos os métodos e para as duas simulações, sendo a diminuição deste valor igual nos dois métodos, em termos de percentagem.

Quadro 8.5 – Resultados obtidos para a avaliação da ponte térmica linear

Simulação		 92%		Δ (%)
$Q_{tr,i}$ (kWh/ano)	REH	4956	4411	- 11
	PHPP	4999	4506	- 9,9
$Q_{ve,i}$ (kWh/ano)	REH	67	67	0
	PHPP	140	144	+ 2,9
$Q_{int,i}$ (kWh/ano)	REH	1475	1475	0
	PHPP	1068	1068	0
$Q_{sol,i}$ (kWh/ano)	REH	1341	1341	0
	PHPP	1322	1322	0
$Q_{g,i}$ (kWh/ano)	REH	2817	2817	0
	PHPP	2391	2391	0
$Q_{gu,i}$ (kWh/ano)	REH	2272	2193	- 3,5
	PHPP	2228	2207	- 0,9
N_{ic} (kWh/(m ² .ano))	REH	28	23	-17,9
	PHPP	29	24	-17,9
N_i (kWh/(m ² .ano))	REH	47	47	
	PHPP	15	15	

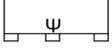
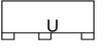
Pode concluir-se que a diminuição do valor da Ψ tem uma significativa importância no valor das perdas por transmissão, sobretudo no REH. Esta significativa importância, reflete-se no valor de N_{ic} em que existiu uma expressiva diminuição. Pelo que se pode concluir que a diminuição das perdas pelas pontes térmicas lineares tem importância na diminuição do valor de N_{ic} . O valor de N_{ic} , no REH, é menor que o valor de N_i , pelo que cumpre o REH. Ao contrário do que acontece para o PHPP, em que o valor de N_{ic} é maior que o valor de N_i , pelo que o edifício não cumpre o requisito do PH para o aquecimento. Uma vez que, o o edifício com menores valores de Ψ é uma melhor solução, a partir deste ponto todos os edifícios estudados têm estes valores de Ψ .

8.5. Avaliação da Influência da Espessura do Isolamento nos Resultados

A importância da espessura do isolamento foi avaliada através da simulação de um edifício com os valores de Ψ retirados do catálogo de pontes térmicas lineares e com uma espessura de isolamento de 12 cm para a fachada e 16 cm para as lajes de cobertura e pavimento. Neste caso, os valores de U são de 0,308 W/(m².°C); 0,189 W/(m².°C) e 0,199 W/(m².°C), respetivamente, para a fachada, laje de cobertura e laje de pavimento. Este valores estão referidos em (Santos, C e Matias, L., 2006). Pelo PHPP obteve-se um valor de N_{ic} de 11 kWh/(m².ano), sendo este valor inferior ao limite, pelo que este edifício cumpre o requisito PH para o aquecimento. No entanto, estes valores de espessura de isolamento são exagerados

para o clima português e não são muito utilizados em Portugal, pelo que ao serem utilizados afastar-se-ia o estudo da realidade. Para além deste facto, não se queria uma verificação do requisito tão prematuramente neste trabalho, pelo que se efetuou uma nova simulação com metade dos valores de espessura de isolamento acima referidos. No quadro 6 são apresentados os valores de U para esta simulação.

Quadro 8.6 – Valores de U para cada elemento

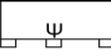
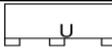
Simulação			
Paredes	Orientação	Norte/Este/Oeste/Sul	
	Cor	Clara	
	Ventilação	Não	
	Área (m ²)	24	
	U (W/(m ² .°C))	0,50	0,42
Pavimento	Área (m ²)	100	
	U (W/(m ² .°C))	0,40	0,35
Cobertura	Área (m ²)	100	
	Cor	Clara	
	U (W/(m ² .°C))	0,40	0,32

Os valores apresentados no quadro 8.7 relativos à simulação do edifício com menor valor de U são os valores apresentados no quadro 8.5. Comparando os resultados apresentados no quadro 8.7, para as duas simulações, verifica-se, e como era esperado, que com a diminuição do valor do coeficiente de transmissão térmica dos elementos da envolvente opaca exterior, o valor de $Q_{tr,i}$ diminui-se. Verifica-se que essa diminuição é ligeiramente maior no PHPP que no REH. Verifica-se, também, uma diminuição muito pouco expressiva do valor de $Q_{ve,i}$ no PHPP. Esta diminuição prende-se com o facto de o valor de G_t diminuir, pela razão já referida nas secções anteriores. Verifica-se uma diminuição pouco expressiva do valor de $Q_{sol,i}$ no PHPP. Isto acontece, porque, no PHPP, se tem em conta os ganhos solares através da envolvente opaca. Ora se existe uma diminuição da transmissão, também, existe uma diminuição dos ganhos solares através desta. O valor de $Q_{gu,i}$ é menor na simulação em que os valores de U são menores, uma vez que, existe uma pouco expressiva variação do valor do fator de utilização sobretudo no PHPP. Verifica-se que para o edifício com menores valores de U, o valor N_{ic} é igual nos dois métodos. Verifica-se, também, de uma significativa diminuição do valor de N_{ic} em ambos os métodos e para as duas simulações.

Pode concluir-se que a diminuição do valor de U tem uma significativa importância no valor das perdas por transmissão, sobretudo no PHPP. Esta significativa importância, reflete-se no valor de N_{ic} em que existiu uma expressiva diminuição. Pelo que se pode concluir que a diminuição das perdas pela envolvente, ou seja, o aumento da espessura do isolamento, tem

importância na diminuição do valor de N_{ic} . O valor de N_{ic} , no REH, é menor que o valor de N_i , pelo que cumpre o REH. Ao contrário do que acontece para o PHPP, em que o valor de N_{ic} é maior que o valor de N_i , pelo que o edifício não cumpre o requisito do PH para o aquecimento. Uma vez que, o edifício com menores valores de U é uma melhor solução, a partir deste ponto todos os edifícios estudados têm estes valores de U .

Quadro 8.7 – Resultados obtidos para a avaliação da espessura do isolamento térmico

Simulação				Δ (%)
$Q_{tr,i}$ (kWh/ano)	REH	4411	3996	- 9,4
	PHPP	4506	3936	- 12,6
$Q_{ve,i}$ (kWh/ano)	REH	67	67	0
	PHPP	144	141	- 2,1
$Q_{int,i}$ (kWh/ano)	REH	1475	1475	0
	PHPP	1068	1068	0
$Q_{sol,i}$ (kWh/ano)	REH	1341	1341	0
	PHPP	1322	1252	- 5,3
$Q_{g,i}$ (kWh/ano)	REH	2817	2817	0
	PHPP	2391	2320	- 3
$Q_{gu,i}$ (kWh/ano)	REH	2193	2120	- 3,3
	PHPP	2207	2116	- 4,1
N_{ic} (kWh/(m ² .ano))	REH	23	20	-13
	PHPP	24	20	-16,7
N_i (kWh/(m ² .ano))	REH	47	47	
	PHPP	15	15	

Pode concluir-se que a diminuição do valor de U tem uma significativa importância no valor das perdas por transmissão, sobretudo no PHPP. Esta significativa importância, reflete-se no valor de N_{ic} em que existiu uma expressiva diminuição. Pelo que se pode concluir que a diminuição das perdas pela envolvente, ou seja, o aumento da espessura do isolamento, tem importância na diminuição do valor de N_{ic} . O valor de N_{ic} , no REH, é menor que o valor de N_i , pelo que cumpre o REH. Ao contrário do que acontece para o PHPP, em que o valor de N_{ic} é maior que o valor de N_i , pelo que o edifício não cumpre o requisito do PH para o aquecimento. Uma vez que, o edifício com menores valores de U é uma melhor solução, a partir deste ponto todos os edifícios estudados têm estes valores de U .

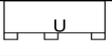
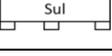
8.6. Avaliação da Influência da Área dos Vãos Envidraçados nos Resultados

Através de cinco simulações onde se variou a área dos vãos envidraçados nas direções Norte, Este, Oeste e Sul avaliou-se a importância da área dos vãos envidraçados nestas direções. Nesta variação de áreas, teve-se sempre a preocupação de o valor da área total de vãos

envidraçados ser mantido. Nas subsecções seguintes é apresentada, mais em pormenor, a avaliação para cada direcção.

Para a avaliação da importância da área de vãos envidraçados a Norte, efetuaram-se duas simulações. Como é mostrado no quadro 8.8, na primeira diminuiu-se o valor da área de vãos envidraçados em metade a Norte e se aumentou-se do mesmo valor a área a Sul, já na segunda o valor da área de vãos envidraçados a Norte passou a zero e o valor da área de vãos envidraçados a Norte passou a 6 m². Para a avaliação da importância da área de vãos envidraçados a Sul, efetuou-se uma simulação, em que o valor da área de vãos envidraçados a Sul é igual a zero e aumentou-se o valor da área a Oeste e a Este em 1,5 m² em cada uma destas direcções.

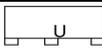
Quadro 8.8 – Valores da área dos vãos envidraçados, após modificação da área na direcção Norte e Sul

Simulação	Área dos vãos envidraçados (m ²)			
	Norte	Oeste	Este	Sul
	3	3	3	3
	1,5	3	3	4,5
	0	3	3	6
	3	1,5	0	4,5

Os valores apresentados no quadro 8.9 relativos à simulação do edifício com menor valor de U são os valores apresentados no quadro 8.7. Comparando os resultados apresentados no quadro 8.9 para quando é diminuída a área do vão envidraçado a norte, verifica-se um aumento muito pouco expressivo do valor de $Q_{tr,i}$, no PHPP, para a situação em que o valor da área de vão envidraçado a Norte é igual a zero. O fato de não existir área de vão envidraçado a Norte leva a um aumento do valor de U médio dos vãos envidraçados e, conseqüentemente, ao aumento do valor de $Q_{tr,i}$. Verifica-se, e como era esperado, que com a diminuição do valor da área do vão envidraçado a Norte e o aumento do valor da área do vão envidraçado a Sul, o valor de $Q_{sol,i}$ aumenta-se. Este aumento é mais expressivo no PHPP e, sobretudo, para a situação em que o valor da área do vão envidraçado a Norte é igual a zero. Com o aumento do valor de $Q_{sol,i}$, verifica-se, sem surpresa, um aumento do valor de $Q_{g,i}$, também, mais expressivo no PHPP. Verifica-se que o valor de N_{ic} é igual em ambas as simulações para o REH. Para o PHPP, verifica-se uma maior diminuição do valor de N_{ic} , quando valor da área do vão envidraçado a Norte é igual a zero.

Comparando os resultados apresentados no quadro 8.9 para quando é diminuída a área do vão envidraçado a sul, verifica-se um aumento muito pouco expressivo do valor de $Q_{tr,i}$, no PHPP. O fato de não existir área de vão envidraçado a Sul leva a um aumento do valor de U médio dos vãos envidraçados e, conseqüentemente, ao aumento do valor de $Q_{tr,i}$. Verifica-se, e como era esperado, que com a diminuição do valor da área do vão envidraçado a Sul, o valor de $Q_{sol,i}$ diminui-se. Esta diminuição é mais expressiva no REH. Com a diminuição do valor de $Q_{sol,i}$, verifica-se, sem surpresa, uma diminuição do valor de $Q_{g,i}$, também, mais expressivo no REH. Verifica-se que o valor de $Q_{gu,i}$ diminui, mas, neste caso, a diminuição mais expressiva é no PHPP. Verifica-se que o valor de N_{ic} é igual em ambas as simulações para ambos os métodos.

Quadro 8.9 – Resultados obtidos para a avaliação da área do vão envidraçado a norte e a sul

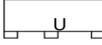
Simulação				Δ (%)		Δ (%)		Δ (%)
$Q_{tr,i}$ (kWh/ano)	REH	3996	3996	0	3996	0	3996	0
	PHPP	3936	3936	0	3945	+ 0,2	3945	+ 0,2
$Q_{ve,i}$ (kWh/ano)	REH	67	67	0	67	0	67	0
	PHPP	141	141	0	141	0	141	0
$Q_{int,i}$ (kWh/ano)	REH	1475	1475	0	1475	0	1475	0
	PHPP	1068	1068	0	1068	0	1068	0
$Q_{sol,i}$ (kWh/ano)	REH	1341	1400	+ 0,4	1459	+ 8,8	1223	- 8,8
	PHPP	1252	1376	+ 9,9	1513	+ 20,8	1178	- 5,9
$Q_{g,i}$ (kWh/ano)	REH	2817	2876	+ 2,1	2934	+ 4,2	2699	- 4,2
	PHPP	2320	2444	+ 5,3	2582	+ 11,3	2246	- 3,2
$Q_{gu,i}$ (kWh/ano)	REH	2120	2148	+ 1,3	2175	+ 2,6	2062	- 2,7
	PHPP	2116	2225	+ 5,2	2342	+ 10,7	2027	- 4,2
N_{ic} (kWh/(m ² .ano))	REH	20	19	- 5,0	19	- 5,0	21	+ 5,0
	PHPP	20	19	- 5,0	17	- 15,0	21	+ 5,0
N_i (kWh/(m ² .ano))	REH	47	47		47		47	
	PHPP	15	15		15		15	

Pode concluir-se que a diminuição do valor da área do vão envidraçado a Norte e o aumento do valor da área do vão envidraçado a Sul tem uma significativa importância no valor dos ganhos solares e nos ganhos brutos, sobretudo, no PHPP. Esta significativa importância, reflete-se no valor de N_{ic} em que existiu uma expressiva diminuição, principalmente no PHPP e quando o valor da área do vão envidraçado a Norte é iguala a zero. Pelo que se pode concluir que a diminuição do valor da área do vão envidraçado a Norte tem importância na diminuição do valor de N_{ic} . Em ambas as situações, o valor de N_{ic} , no REH, é menor que o valor de N_i , pelo que cumpre o REH. Ao contrário do que acontece para o PHPP, em que o valor de N_{ic} é maior que o valor de N_i , pelo que o edifício não cumpre o requisito do PH para o aquecimento.

Pode concluir-se que a diminuição do valor da área do vão envidraçado a Sul tem uma expressiva importância no valor dos ganhos solares, nos ganhos brutos e nos ganhos úteis. Esta expressiva importância, reflete-se no valor de N_{ic} em que existiu um aumento. Pelo que se pode concluir que a diminuição do valor da área do vão envidraçado a Sul tem importância no aumento do valor de N_{ic} . O valor de N_{ic} , no REH, é menor que o valor de N_i , pelo que cumpre o REH. Ao contrário do que acontece para o PHPP, em que o valor de N_{ic} é maior que o valor de N_i , pelo que os edifícios não cumprem o requisito do PH para o aquecimento.

Para a avaliação da importância da área de vãos envidraçados a Oeste e a Este, efetuaram-se duas simulações. Como é mostrado no quadro 8.10, na primeira diminuiu-se o valor da área de vãos envidraçados em metade a Oeste e se aumentou-se do mesmo valor a área a Sul, já na segunda diminuiu-se o valor da área de vãos envidraçados em metade a Este e se aumentou-se do mesmo valor a área a Sul.

Quadro 8.10 – Valores da área dos vãos envidraçados, após modificação da área na direção Oeste e Este

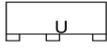
Simulação	Área dos vãos envidraçados (m ²)			
	Norte	Oeste	Este	Sul
	3	3	3	3
	3	1,5	0	4,5
	3	3	1,5	4,5

Comparando os resultados apresentados no quadro 8.11, verifica-se que os valores dos resultados obtidos são iguais ou muito próximos. Este resultado já era esperado, pois a exposição solar na direção Este e Oeste é muito semelhante. Verifica-se, e como era esperado, que com a diminuição do valor da área do vão envidraçado a Oeste e a Este e o aumento do valor da área do vão envidraçado a Sul, o valor de $Q_{sol,i}$ aumenta-se. Este aumento é muito semelhante para ambos os métodos. Com o aumento do valor de $Q_{sol,i}$, verifica-se, sem surpresa, um aumento do valor de $Q_{g,i}$, também, muito semelhante para ambos os métodos. Verifica-se que o valor de N_{ic} é igual em ambas as simulações para ambos os métodos, sendo a sua diminuição igual em termos de percentagem.

Pode concluir-se que a diminuição do valor da área do vão envidraçado a Oeste e a Este e o aumento do valor da área do vão envidraçado a Sul tem uma significativa importância no valor dos ganhos solares e nos ganhos brutos. Esta significativa importância, reflete-se no valor de N_{ic} em que existiu uma diminuição. Pelo que se pode concluir que a diminuição do valor da área do vão envidraçado a Oeste e a Este tem importância na diminuição do valor de

N_{ic} . Em ambas as situações, o valor de N_{ic} , no REH, é menor que o valor de N_i , pelo que cumpre o REH. Ao contrário do que acontece para o PHPP, em que o valor de N_{ic} é maior que o valor de N_i , pelo que os edifícios não cumprem o requisito do PH para o aquecimento.

Quadro 8.11 – Resultados obtidos para a avaliação da área do vão envidraçado a Oeste e Este

Simulação				Δ (%)		Δ (%)
$Q_{tr,i}$ (kWh/ano)	REH	3996	3996	0	3996	0
	PHPP	3936	3936	0	3936	0
$Q_{ve,i}$ (kWh/ano)	REH	67	67	0	67	0
	PHPP	141	141	0	141	0
$Q_{int,i}$ (kWh/ano)	REH	1475	1475	0	1475	0
	PHPP	1068	1068	0	1068	0
$Q_{sol,i}$ (kWh/ano)	REH	1341	1400	+ 4,4	1400	+ 4,4
	PHPP	1252	1310	+ 4,6	1312	+ 4,8
$Q_{g,i}$ (kWh/ano)	REH	2817	2876	+ 2,1	2876	+ 2,1
	PHPP	2320	2379	+ 2,5	2380	+ 2,6
$Q_{gu,i}$ (kWh/ano)	REH	2120	2148	+ 1,3	2148	+ 1,3
	PHPP	2116	2178	+ 2,9	2179	+ 3,0
N_{ic} (kWh/(m ² .ano))	REH	20	19	- 5,0	19	- 5,0
	PHPP	20	19	- 5,0	19	- 5,0
N_i (kWh/(m ² .ano))	REH	47	47		47	
	PHPP	15	15		15	

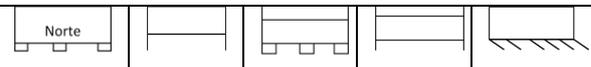
Destas cinco situações, conclui-se que a melhor solução é não existir área de vão envidraçado a Norte e existir uma maior área de vão envidraçado a Sul. Em termos de conforto de luminosidade, já para não referir que a não existência de área de vão envidraçado numa direção é um pouco radical, a partir deste ponto todos os edifícios estudados têm um valor de área de vão envidraçado a Norte igual a 1,5 m²; a Oeste e a Este igual a 3m² e a Sul igual a 6 m².

8.7. Avaliação da Influência das Condições de Fronteira nos Resultados

Para a avaliação da importância das condições de fronteira efetuaram-se quatro simulações. Na primeira a laje de pavimento deixou de estar em contato com o exterior, ficando em contato com um espaço não-útil. Na segunda a laje de cobertura deixou de estar em contato com o exterior, ficando em contato com um espaço não-útil. Neste caso, a laje de pavimento voltou a estar em contato com o exterior. Na terceira, tanto a laje de pavimento como a laje de cobertura estão em contato com um espaço não-útil. Na última simulação, a laje de pavimento

está em contato com o solo e a laje de cobertura em contato com o exterior. Os valores de B e de Ψ das ligações entre elementos são apresentados no quadro 8.12.

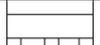
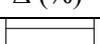
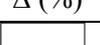
Quadro 8.12 – Valores de B e de Ψ das ligações entre elementos

Simulação							
Ligação entre elementos	Fachada com pav. sobre exterior	B (m)	40		40		
		Ψ (W/(m.°C))	0,28		0,28		
	Fachada com cobertura	B (m)	40	40			40
		Ψ (W/(m.°C))	0,29	0,29			0,29
	Fachada com pav. intermédio	B (m)		40	40	80	
		Ψ (W/(m.°C))		0,21	0,21	0,21	
	Duas paredes vertic. em âng. saliente	B (m)	10,80	10,80	10,80	10,80	10,80
		Ψ (W/(m.°C))	0,19	0,19	0,19	0,19	0,19
	Fachada com caixilharia	B (m)	28	28	28	28	28
		Ψ (W/(m.°C))	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06
	Fachada com pav. térreo	B (m)					40
		Ψ (W/(m.°C))					0,56

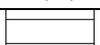
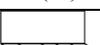
Comparando os resultados apresentados no quadro 8.13, verifica-se uma diminuição pouco expressiva do valor de $Q_{tr,i}$, no REH, para as quatro simulações. No PHPP, esta diminuição é mais expressiva, sobretudo para as simulações em que a laje de pavimento esta em contacto com espaço não-útil. No PHPP, o valor de $Q_{ve,i}$ tem expressivo aumento, em todas as simulações, excepto para a simulação em que o edifício está em contacto com o solo, em que existe uma diminuição deste valor. Esta variação prende-se com o facto de o valor de G_t variar, pela razão já referidas em secções anteriores. Verifica-se para o PHPP e para a situação em que o edifício está em contacto com o solo, uma diminuição do valor de Q_{int} devido à diminuição do comprimento do período de aquecimento, pelo facto de a laje de pavimento estar em contacto com o solo. Verifica-se um aumento do $Q_{sol,i}$, no REH, para os edifícios que têm mais que um piso. Este facto acontece porque o valor do ângulo de obstrução do horizonte diminui.

Comparando os resultados apresentados no quadro 8.14, verifica-se um aumento do $Q_{g,i}$, no REH, para os edifícios que têm mais que um piso, pelo facto de existir um aumento de $Q_{sol,i}$ nestes edifícios. Verifica-se que o valor de N_{ic} diminui significativamente para ambos os métodos em todas as simulações, sendo essa diminuição mais significativa para os edifícios em que alaje de pavimento está em contacto com espaço não-útil e no PHPP.

Quadro 8.13 – Resultados obtidos para $Q_{tr,i}$, $Q_{ve,i}$, $Q_{int,i}$ e $Q_{sol,i}$ na avaliação da condição de fronteira

Simulação	$Q_{tr,i}$ (KWh/ano)		$Q_{ve,i}$ (KWh/ano)		$Q_{int,i}$ (KWh/ano)		$Q_{sol,i}$ (KWh/ano)	
	REH	PHPP	REH	PHPP	REH	PHPP	REH	PHPP
	3996	3936	67	141	1475	1068	1400	1376
	3757	3291	67	144	1475	1068	1718	1376
Δ (%)	- 6,0	- 16,4	0	+ 2,1	0	0	+ 22,7	0
	3747	3699	67	144	1475	1068	1400	1376
Δ (%)	- 6,2	- 7,4	0	+ 2,1	0	0	0	0
	3682	3055	67	148	1475	1068	1718	1376
Δ (%)	- 7,6	- 22,4	0	+ 5,0	0	0	+ 22,7	0
	3783	3644	67	131	1475	912	1400	1121
Δ (%)	- 5,3	- 7,4	0	- 7,1	0	- 17,1	0	-18,5

Quadro 8.14 – Resultados obtidos para $Q_{g,i}$, $Q_{gu,i}$, N_{ic} e N_i na avaliação da condição de fronteira

Simulação	$Q_{g,i}$ (KWh/ano)		$Q_{gu,i}$ (KWh/ano)		N_{ic} (KWh/(m ² .ano))		N_i (KWh/(m ² .ano))	
	REH	PHPP	REH	PHPP	REH	PHPP	REH	PHPP
	2876	2444	2148	2225	19	19	47	15
	3194	2444	2232	2199	16	12	47	15
Δ (%)	+ 11,1	0	+ 3,9	- 1,2	- 15,8	- 36,8		
	2876	2444	2097	2208	17	16	47	15
Δ (%)	0	0	- 2,4	- 0,8	- 10,5	- 15,8		
	3193	2444	2213	2173	15	10	47	15
Δ (%)	+ 11,1	0	+ 3,0	- 2,3	- 21,1	- 47,4		
	2876	2033	2104	1999	17	18	49	15
Δ (%)	0	- 16,8	- 2,0	- 10,2	- 10,5	- 5,3		

Pode concluir-se que a variação das condições de fronteira tem uma expressiva importância no valor de todas as perdas e todos os ganhos. Esta expressiva importância, reflete-se no valor de N_{ic} em que existiu uma significativa diminuição, sobretudo no PHPP, para edifícios em que a laje de pavimento está em contacto com espaço não-útil. O valor de N_{ic} , no REH, é menor que o valor de N_i , pelo que cumpre o REH, em todas as situações. No PHPP, o valor de N_{ic} é menor que o valor de N_i , para os edifícios em que a laje de pavimento está em contacto com espaço não-útil, pelo que estes edifícios cumprem o requisito do PH para o aquecimento. Para

as outras duas situações, o valor de N_{ic} é maior que o valor de N_i , pelo que estes edifícios cumprem o requisito do PH para o aquecimento. Uma vez que, a melhor solução é a que a laje de pavimento e cobertura estão em contacto com espaços não-úteis, a partir deste ponto os edifícios em estudo tem 3 pisos e a fração em estudo é a que se encontra no piso do meio.

8.8. Avaliação da Influência do Sombreamento nos Resultados

Para a avaliação da importância do sombreamento de vãos envidraçados efetuou-se uma simulação em que em todos os vãos envidraçados deixou de existir a pala horizontal e passou a existir em todos eles uma persiana de régua plástica de cor clara colocada pelo exterior. No quadro 8.15 são apresentados todos os valores alterados para esta simulação.

Quadro 8.15 – Valores de α , g_{sT} , B, Ψ e permeabilidade da caixa de estore para a avaliação do sombreamento

Simulação	Obstr. do horizonte	Pala Hor. α	Permeab. cx de estore	FS Global Prot. Perm. e móveis g_{sT}	Ligação entre elementos	
					Zona caixa de estore	
					B (m)	Ψ (W/ m. ² C)
	33°	23°	Não tem	0,38		
			Baixa	0,04	8	0,13

Comparando os resultados apresentados no quadro 8.16, verifica-se um aumento muito pouco significativo do valor de $Q_{tr,i}$, em ambos os métodos. Esta diminuição prende-se com o facto de existir mais um ponte térmica linear a considerar, por via, da retirada da pala e da colocação do estore com caixa. No PHPP, o valor de $Q_{ve,i}$ tem uma muito pouco significativa diminuição. Esta diminuição prende-se com o facto de o valor de G_t diminuir, pela razão já referidas em secções anteriores. Verifica-se um significativo aumento do $Q_{sol,i}$, em ambos os métodos, sendo mais expressivo no REH. Verifica-se um aumento do $Q_{g,i}$, em ambos os métodos, pelo facto de existir um aumento de $Q_{sol,i}$. Verifica-se que o valor de N_{ic} diminui significativamente para REH, sendo que no PHPP não varia.

Pode concluir-se que o sombreamento tem uma expressiva importância no valor dos ganhos solares. Esta expressiva importância, reflete-se no valor de N_{ic} em que existiu uma significativa diminuição, sobretudo, no REH. O valor de N_{ic} , no REH, é menor que o valor de N_i , pelo que cumpre o REH. No PHPP, o valor de N_{ic} é menor que o valor de N_i , pelo que estes edifícios cumprem o requisito do PH para o aquecimento. Uma vez que, a melhor solução é a que não existe pala horizontal, a partir deste ponto os edifícios em estudo não têm este dispositivo de sombreamento.

Quadro 8.16 – Resultados obtidos para a avaliação do sombreamento

Simulação				Δ (%)
$Q_{tr,i}$ (kWh/ano)	REH	3682	3706	+ 0,7
	PHPP	3055	3077	+ 0,7
$Q_{ve,i}$ (kWh/ano)	REH	67	67	0
	PHPP	148	147	- 0,7
$Q_{int,i}$ (kWh/ano)	REH	1475	1475	0
	PHPP	1068	1068	0
$Q_{sol,i}$ (kWh/ano)	REH	1718	2068	+ 20,4
	PHPP	1376	1514	+ 10,0
$Q_{g,i}$ (kWh/ano)	REH	3193	3543	+ 11,0
	PHPP	2444	2582	+ 5,6
$Q_{gu,i}$ (kWh/ano)	REH	2213	2349	+ 6,1
	PHPP	2173	2260	+ 4,0
N_{ic} (kWh/(m ² .ano))	REH	15	14	- 6,7
	PHPP	10	10	0
N_i (kWh/(m ² .ano))	REH	47	47	
	PHPP	15	15	

8.9. Avaliação da Influência da Exposição ao Vento nos Resultados

Para a avaliação da importância da exposição ao vento efetuaram-se duas simulações, em que se deslocou o edifício do interior da zona urbana para uma zona rural e para uma zona muito exposta dentro do município de Lisboa. No quadro 8.17 são apresentados os valores de α_h para as três situações.

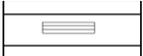
Quadro 8.17 – Valores de α_h para a avaliação da exposição ao vento

Simulação	Localização	Obstrução do horizonte α_h
	Interior da zona urbana	33°
rural	Zona rural	17°
exposta	Zona muito exposta	5°

Comparando os resultados apresentados no quadro 8.18, verifica-se uma diminuição muito pouco significativa do valor de $Q_{tr,i}$, no PHPP. Esta diminuição prende-se com o facto de o valor de G_t diminuir, pela razão já referidas em secções anteriores. No PHPP, o valor de $Q_{ve,i}$ tem um substancial aumento, que aumenta com o aumento exposição ao vento. Este aumento deve-se ao facto de com uma maior exposição ao vento, existir uma maior taxa de infiltração

e, conseqüentemente, uma maior perda por ventilação. Também no PHPP, o valor de $Q_{int,i}$ tem uma diminuição pouco significativa, que se prende com o facto de o valor do período de aquecimento diminuir. Verifica-se um significativo aumento do $Q_{sol,i}$, em ambos os métodos, sendo mais expressivo para a situação de maior exposição ao vento. Este aumento explica-se pelo aumento dos ganhos solares, uma vez que, existiu diminuição do valor do ângulo de obstrução do horizonte, aumentando o valor da área efetiva coletora do vão envidraçado, logo maior ganho solar. Verifica-se um aumento do $Q_{g,i}$, em ambos os métodos e para ambas as situações, pelo facto de existir um aumento de $Q_{sol,i}$. No caso do PHPP e para a localização do edifício em zona rural, verifica-se um pouco significativo aumento do valor de $Q_{g,i}$, uma vez que, o aumento do valor de $Q_{sol,i}$ é quase todo compensado pela diminuição do valor de $Q_{int,i}$. Verifica-se que o valor de N_{ic} diminui significativamente para REH, sendo que no PHPP esta diminuição é substancial.

Quadro 8.18 – Resultados obtidos para a avaliação da exposição ao vento

Simulação			rural	Δ (%)		Δ (%)
$Q_{tr,i}$ (kWh/ano)	REH	3706	3706	0	3706	0
	PHPP	3077	2850	- 7,4	2840	- 7,7
$Q_{ve,i}$ (kWh/ano)	REH	67	67	0	67	0
	PHPP	147	194	+ 32,0	248	+ 68,7
$Q_{int,i}$ (kWh/ano)	REH	1475	1475	0	1475	0
	PHPP	1068	912	- 14,6	912	- 14,6
$Q_{sol,i}$ (kWh/ano)	REH	2068	2822	+ 36,5	3045	+ 47,2
	PHPP	1514	1751	+ 15,7	2256	+ 49,0
$Q_{g,i}$ (kWh/ano)	REH	3543	4297	+ 21,3	4520	+ 27,6
	PHPP	2582	2663	+ 3,1	3168	+ 22,7
$Q_{gu,i}$ (kWh/ano)	REH	2349	2580	+ 9,9	2638	+ 12,3
	PHPP	2260	2385	+ 5,5	2633	+ 16,5
N_{ic} (kWh/(m ² .ano))	REH	14	12	- 14,3	11	- 21,4
	PHPP	10	7	- 30,0	5	- 50,0
N_i (kWh/(m ² .ano))	REH	47	47		47	
	PHPP	15	15		15	

Pode concluir-se que a exposição ao vento tem uma muito expressiva importância no valor dos ganhos solares, em ambos os métodos. No PHPP, a exposição ao vento tem, também, uma substancial importância no valor das perdas por ventilação e no valor dos ganhos internos. O valor de N_{ic} tem uma muito significativa diminuição, sobretudo, no PHPP. O valor de N_{ic} , em ambos os métodos, é menor que o valor de N_i , pelo que os edifícios cumprem o REH e cumprem o requisito do PH para o aquecimento.

8.10. Avaliação da influência dos dados climáticos em função da Localização

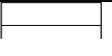
Para a avaliação da importância da localização do edifício efetuaram-se três simulações em que se deslocaram três edifícios já estudados neste trabalho do município de Lisboa para o município do Porto. Escolheram-se os seguintes edifícios: edifício da simulação em que a eficiência do sistema de ventilação mecânica com recuperação de calor passou para o valor de 92%; edifício da simulação em que a laje de pavimento deixou de estar em contato com o exterior e edifício em que foi retirada a pala horizontal.

Os resultados do quadro 8.19 relativos à localização dos edifícios em Lisboa são os resultados apresentados nos quadros 8.3, 8.13 e 8.16. Comparando os resultados apresentados no quadro 8.19, verifica-se um aumento substancial do valor de N_{ic} , para ambos os métodos, mas sobretudo no PHPP. Para ambos os métodos, este aumento do valor de N_{ic} deve-se ao facto de a duração da estação de aquecimento ser maior. Para além disso, o valor do número de graus-dias de aquecimento, no REH, e o valor do número de graus-horas de aquecimento, no PHPP, aumentam.

No caso do REH, este aumento deve-se ao facto de, na nova localização, Já no caso do PHPP, para além do este aumento deve-se ao facto de, na nova localização, a duração da estação de aquecimento ser maior e o valor do número de graus-horas de aquecimento ser maior. Apesar de existir um aumento do valor dos ganhos solares e internos, esse aumento é muito pouco expressivo quando comparado com o aumento do valor das perdas por transmissão e por ventilação. Verifica-se que edifícios que, em Lisboa, verificavam o requisito de PH para o aquecimento, no Porto, não o verificam. Verifica-se que o valor de N_{ic} aumenta substancialmente nos dois métodos, sendo que no PHPP este aumento é muito mais expressivo.

Pode concluir-se que a localização do edifício tem uma importância expressiva em todas as perdas e em todos os ganhos devido sobretudo à variação da duração da estação de aquecimento e do valor do número de graus-dias de aquecimento ou o valor do número de graus-horas de aquecimento. O valor de N_{ic} tem um substancial aumento, sobretudo, no PHPP. Para as três situações, o valor de N_{ic} , no REH, é menor que o valor de N_i , pelo que os edifícios cumprem o REH, ao contrário do que acontece no PHPP em que nenhuma situação o requisito do PH para o aquecimento é cumprido.

Quadro 8.19 – Valores obtidos de N_{ic} e N_i para a avaliação da localização

Simulação										
		Lisboa	Porto	Δ (%)	Lisboa	Porto	Δ (%)	Lisboa	Porto	Δ (%)
N_{ic} (KWh/m ² .ano)	REH	28	38	+ 35,7	16	27	+ 68,8	14	21	+ 50,0
	PHPP	29	44	+ 65,9	12	24	+ 50,0	10	21	+ 110
N_i (KWh/m ² .ano)	REH	47	63		47	63		47	63	
	PHPP	15	15		15	15		15	15	

9. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com a execução deste estudo, compararam-se duas metodologias (PHPP e REH) com o intuito de avaliar a importância de algumas variáveis, nomeadamente, a eficiência do sistema de ventilação mecânica com recuperação de calor, as pontes térmicas, a espessura do isolamento, a área dos vãos envidraçados, a exposição ao vento, a localização do edifício, as condições de fronteira e o sombreamento.

De uma forma geral, conclui-se que algumas variáveis tem uma significativa importância no valor das perdas e/ou dos ganhos e que essa importância não se reflete no valor das necessidades de energia para o aquecimento. É exemplo disto, a avaliação das seguintes variáveis eficiência do sistema de ventilação. Neste caso, o valor das perdas por ventilação diminui 70,6% e 49,3%, respetivamente, para o REH e o PHPP e o valor da necessidade de energia para o aquecimento diminui, aproximadamente, 3%.

Verificou-se que as variáveis com significativa importância na diminuição do valor da necessidade de energia para o aquecimento são as pontes térmicas lineares; a espessura do isolamento; as condições de fronteira e a exposição ao vento.

Verificou-se que no PHPP existe um agravamento dos dados climáticos para Portugal, sendo estes valores muito diferentes do utilizados pelo REH. Este aspeto deve ser verificado e retificado futuramente.

Futuramente, seria interessante analisar as variáveis deste estudo em termos de necessidade de energia de arrefecimento e de necessidade de energia primária. Seria, também, interessante estudar a importância do aspeto arquitetónico nestas variáveis.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Alfano, F., Dell’Isola, M., Ficco, G. e Tassini, F. (2012). “Experimental analysis of air tightness in Mediterranean buildings using the fan pressurization method”. *Building and Environment*, Vol. 53, pp. 16 - 25.

Audenaert, A., Cleyn, S. e Vankerckhove, B. (2008). “Economic analysis of passive houses and low-energy houses compared with standard houses”. *Energy Policy*, vol. 36, pp. 47–55.

Badescu, V. (2005). "Simulation analysis for the active solar heating system of a passive house". *Applied Thermal Engineering*, Vol. 25, pp. 2754 - 2763.

Badescu, V., Laaser, N. e Crutescu, R. (2010). "Warm season cooling requirements for passive buildings in Southeastern Europe (Romania)". *Energy*, Vol. 35, pp. 3284 – 3300.

Badescu, V., Laaser, N., Crutescu, R., Crutescu, M., Dobrovicescu, A. e Tsatsaronis, G. (2011). "Modeling, validation and time-dependent simulation of the first large passive building in Romania". *Renewable Energy*, Vol. 36, pp. 142 - 157.

DGEG (2013). “Balanço Energético Sintético 2013”. Direcção Geral de Energia e Geologia.

Dimitroulopoulou, C. (2012). "Ventilation in European dwellings: A review". *Building and Environment*, Vol. 47, pp. 109 - 125.

Diretiva 2010/31/UE do Parlamento Europeu e do Conselho. (19 de maio de 2010). *Jornal Oficial da União Europeia*.

Elswijk, M. e Kaan, H. (2008). “European Embedding of Passive Houses.” *Promoting of European Passive Houses*

Feist, W., Schnieders, J., Dorer, V. e Haas, A. (2005). "Re-inventing air heating: Convenient and comfortable within the frame of the Passive House concept". *Energy and Buildings*, Vol. 37, pp. 1186 – 1203.

Gonçalves, H. e Graça, J. M. (2004). “Conceitos Bioclimáticos para os Edifícios em Portugal”. DGGE/IP - 3E, Lisboa.

INE (2013). “ O Parque habitacional e a sua reabilitação - análise e evolução 2001 – 2011. Instituto Nacional de Estatística e Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa.

Santos, C e Matias, L. (2006) “Coeficientes de Transmissão Térmica para Elementos na Envolvente Opaca”. LNEC

ITeCons (2014). “Catálogo de pontes térmicas”. ITeCons e ADENE. Disponível online em <http://www.itecons.uc.pt/index.php?module=pubs&id=10>

Langmans, J., Klein, R., Paepe, M. e Roels, Staf. (2010). “Potential of wind barriers to assure airtightness of wood-frame low energy constructions”. *Energy and Buildings*, Vol. 42, pp. 2376 – 2385.

Marcelino, J. e Gavião, J. (2012). “The First Passive House in Portugal”. 16th Passive House Conference, Hannover. *Energy and Buildings*, Vol. 43, pp. 1443 – 1451.

Mlakar, J. e Strancar, J. (2011). “Overheating in residential passive house: Solution strategies revealed and confirmed through data analysis and simulations”.

Mlecnik, E., Schütze, T., Jansen, S., Vries, G., Visscher, H. e Hal, A. (2012). “End-user experiences in nearly zero-energy houses”. *Energy and Buildings*, Vol. 49, pp. 471 – 478.

Passive House Planning Package – Energy balance and passive house design tool for quality approved passive house and EnerPhit retrofits. Versão 7. Passive House Institute

Passive-On (2007). “A norma Passivhaus em climas quentes da Europa: diretrizes de projeto para casas confortáveis de baixo consumo energético.” Passive-On Project, Milão

PHI@ (2014). http://passiv.de/en/03_certification/02_certification_buildings/04_enerphit/04_enerphit.htm. Passivhaus Institut (página internet oficial), Darmstadt.

PHPT@ (2014) <http://passivhaus.pt/>. Associação Passivhaus Portugal (página internet oficial), Ílhavo.

Persson, M., Roos, A. e Wall, M. (2006) “Influence of window size on the energy balance of low energy houses”. *Energy and Buildings*, Vol. 38, pp. 181 – 188.

REH (2013). Regulamento do Desempenho Energético dos Edifícios de Habitação. Decreto - Lei n° 188/2013 de 20 de agosto.

Ribas, R. (2012). “O que vai mudar com os NZEB?” *Climatização*, pp. 7-14

Sadineni, S., Madala, S. e Boehm, R. (2011). "Passive building energy savings: A review of building envelope components". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 15, pp. 3617–3631

Schnieders, J. e Hermelink, A. (2006). "CEPHEUS results: measurements and occupants' satisfaction provide evidence for Passive Houses being an option for sustainable building". *Energy Policy*, Vol. 34, pp. 151–171.