



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

Análise paramétrica de uma solução passiva para uma moradia com estrutura em aço leve

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

Autor

Bruno António dos Santos Cabanas Cardoso

Orientadores

Professora Doutora Helena Maria dos Santos Gervásio

Professor Doutor Paulo Fernando Antunes dos Santos

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, Junho, 2013

AGRADECIMENTOS

Agradeço à Professora Doutora Helena Maria dos Santos Gervásio e ao Professor Doutor Paulo Fernando Antunes dos Santos, orientadores deste trabalho, pela total disponibilidade e empenho demonstrado, pelas ilustrações e documentos disponibilizados, e pelas correcções e melhoramentos sugeridos nas diferentes etapas do trabalho e que contribuíram para o resultado final apresentado.

RESUMO

A preocupação com o aquecimento global e com o aumento do preço dos combustíveis fósseis (petróleo, carvão mineral e gás natural) é cada vez maior. Estas duas causas têm motivado a procura de uma solução construtiva capaz de reduzir, tanto as emissões de dióxido de carbono como a factura energética dos edifícios residenciais.

O objectivo deste artigo recai sobre o estudo de casas passivas, com destaque para as casas “Passivhaus”, onde são usados sistemas passivos de aquecimento e arrefecimento, como alternativa aos sistemas mecânicos (que usam combustíveis fósseis), para manter a temperatura interior de conforto das casas.

Este documento começa por descrever a importância das casas passivas para a redução das emissões de dióxido de carbono e da factura energética. De seguida é aplicado o conceito de casa “Passivhaus”, a uma moradia com estrutura em aço leve situada no distrito de Coimbra, de forma a verificar através de uma análise paramétrica, quais os sistemas construtivos mais indicados para reduzir o consumo de energia (incorporada e operacional) e quais as necessidades construtivas (espessura do isolamento, tipo de vidros, tipo de ventilação, etc.) que permitem o cumprimento da norma Passivhaus para o clima de Coimbra.

Com este trabalho concluiu-se ser possível cumprir a norma Passivhaus, para o caso de estudo, utilizando níveis de isolamento típicos das casas “Passivhaus” situadas no Sul da Europa e adoptando soluções construtivas correntes de casas com estrutura leve em aço.

Palavras-chave: Sistemas passivos, Passivhaus, Energia incorporada, EnergyPlus, Dióxido de carbono, Construção em aço leve.

ABSTRACT

The concern about global warming and the rising price of fossil fuels (oil, coal and natural gas) is increasing. These two reasons have motivated the search for a constructive solution capable of reduce both emissions of carbon dioxide as the energy bill, in the residential buildings.

The aim of this paper is on the study of passive houses, especially "Passivhaus" houses, where are used passive systems for heating and cooling, as an alternative to mechanical systems (which use fossil fuels), to keep the inside temperature of comfort of houses.

This paper begins by describing the importance of passive houses to reduce carbon dioxide emissions and energy bills. Subsequently is applied the concept of "Passivhaus" houses, to a house with lightweight steel frame, located in the district of Coimbra, in order to verify, though a parametric analysis, which systems are best suited to reduce energy consumption (embodied and operational) and the constructive needs (thick insulation, type of windows, type of ventilation, etc.) that allow the fulfillment of the Passivhaus norm for the climate of Coimbra.

With this work concludes to be possible to fulfill the Passivhaus norm, for the case study, using isolation levels typical of the "Passivhaus" houses located in Southern Europe and adopting traditional constructive solutions of houses with lightweight steel frame.

Keywords: Passive systems, Passivhaus, Embodied energy, EnergyPlus, Carbon dioxide, Light steel framing.

ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Enquadramento do tema	1
1.2	Objectivos	2
1.3	Organização da Dissertação	2
2	DIFERENTES CONCEITOS DE CASAS.....	3
2.1	Casas tradicionais	3
2.2	Casas de reduzido consumo energético	3
2.3	Casas passivas	3
2.4	Casas “Passivhaus”	4
2.4.1	Norma Passivhaus	5
2.5	Normas Europeias	6
3	PERSPECTIVA HISTÓRICA DAS CASAS PASSIVAS.....	8
3.1	Casas passivas na Europa.....	8
3.2	Casas passivas em Portugal.....	11
3.3	Casas passivas no futuro	13
4	CONCEPÇÃO E CONSTRUÇÃO DE CASAS PASSIVAS	14
4.1	Sistemas passivos de aquecimento	14
4.1.1	Sistemas de ganho directo	14
4.1.2	Sistemas de ganho indirecto	15
4.1.3	Sistemas de ganho isolado.....	16
4.2	Sistemas passivos de arrefecimento	16
4.2.1	Ventilação cruzada.....	17
4.2.2	Arrefecimento pelo solo.....	17
4.2.3	Arrefecimento evaporativo.....	17
4.2.4	Arrefecimento radiativo	18
4.3	Sistemas activos	18
4.3.1	Colectores solares	18
4.3.2	Bombas de calor geotérmicas	19
4.3.3	Sistema mecânico de ventilação com recuperação de calor.....	20
4.4	Arquitectura passiva	21
4.5	Projecto passivo.....	21
4.6	Construção de casas passivas	21
4.6.1	Orientação e forma do edifício	21

4.6.2	Área e orientação dos Envidraçados.....	22
4.6.3	Inércia térmica	22
4.6.4	Isolamento térmico	22
4.6.5	Impermeabilidade ao ar.....	27
5	CASO DE ESTUDO: Mini-Haven	27
5.1	Introdução	27
5.2	Moradia Mini-Haven	27
5.2.1	Geometria.....	27
5.2.2	Dados climáticos.....	28
5.2.3	Tipo de ocupação e ganhos internos.....	31
5.3	Software	31
5.4	Análise base	33
5.4.1	Climatização e águas quentes sanitárias	33
5.4.2	Isolamento térmico	33
5.4.3	Portas, janelas e sombreamento.....	36
5.4.4	Conforto térmico.....	37
5.4.5	Ganhos internos de calor.....	38
5.4.6	Perdas e ganhos de calor pela envolvente exterior	39
5.4.7	Consumo de energia.....	41
5.5	Análise paramétrica	42
5.5.1	Influência da orientação do edifício.....	42
5.5.2	Influência do nível de isolamento térmico	43
5.5.3	Influência dos envidraçados	45
5.5.4	Influência do sistema de ventilação	47
5.5.5	Influência da impermeabilidade ao ar.....	48
5.5.6	Influência da inércia térmica	49
5.5.7	Emissões de CO ₂ resultantes do consumo energético.....	50
5.5.8	Energia incorporada dos materiais.....	51
6	CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS.....	53
6.1	Conclusões	53
6.2	Trabalhos futuros.....	54
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	55
	ANEXOS.....	59
	ANEXO A – Geometria da moradia Mini-Haven	A-1
	ANEXO B – Limites impostos pelo RCCTE para a análise base	B-1
	ANEXO C – Horário de ocupação da moradia Mini-Haven.....	C-1
	ANEXO D – Energia incorporada dos materiais.....	D-1

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1- Casas passivas em: a) Budapeste, Hungria (Mendonça, 2005); b) Porto Santo, Portugal (Gonçalves et al., 2004).	4
Figura 2.2- Casas “Passivhaus” em: a) Ganderkese, Alemanha; b) Cherasco, Itália (Passive-On Project, 2007c).	4
Figura 2.3- Comparação entre o consumo de energia de uma casa tradicional (Reference) e uma casa “Passivhaus” (CEPHEUS) (Schnieders et al., 2006).	5
Figura 3.1- Rua estreita do bairro de Santa Cruz em Sevilha, Espanha (Passive-On Project, 2007a).	8
Figura 3.2- Primeira casa “Passivhaus” (Schnieders, 2006).	9
Figura 3.3- Casa tradicional em Setúbal, Portugal (Gonçalves e Graça, 2004).	12
Figura 3.4- Necessidades de aquecimento (vermelho) e arrefecimento (azul) de uma casa tradicional (Construída cumprindo os mínimos do RCCTE) e de uma casa “Passivhaus” em Lisboa (Passive-On Project, 2007c).	12
Figura 3.5- Primeira casa “Passivhaus” portuguesa (Cardoso e Ascenso, 2011).	13
Figura 4.1- a) Sistema de ganho directo; b) Esquema de funcionamento (Gonçalves et al., 2004).	15
Figura 4.2- a) Parede Trombe; b) Esquema de funcionamento (Gonçalves et al., 2004).	15
Figura 4.3- a) Estufa (Lanham et al., 2004); b) Esquema de funcionamento (Patrocínio, 2006). 16	
Figura 4.4- a) Funcionamento das palas durante o verão e Inverno; Sombreamento de uma árvore de folha caduca; b) No Verão; c) No Inverno (Lanham et al., 2004).	16
Figura 4.5- Esquema de funcionamento da ventilação cruzada (Passivhaus Institut@, 2013).	17
Figura 4.6- Entrada de ar: a) No exterior do edifício; b) No interior do edifício; c) Esquema de funcionamento (Gonçalves et al., 2004).	17
Figura 4.7- a) Sistema evaporativo; b) Esquema de funcionamento (Patrocínio, 2006).	18
Figura 4.8- Esquema de funcionamento do arrefecimento radiativo (Gonçalves e Graça, 2004).	18
Figura 4.9- a) Colector solar; b) Sistema de funcionamento (NotaPossitiva@, 2013).	19
Figura 4.10- a) Bomba de calor (Coelho, 2007), Sistema de tubos: b) Vertical; c) Horizontal (Tavares, 2011).	19
Figura 4.11- Sistema de ventilação com recuperação de calor (Passivhaus Institut@, 2013).	20

Figura 4.12- Isolamento térmico de uma casa passiva (Passivhaus Institut@, 2013).	23
Figura 4.13- Isolamento: a) Pelo exterior; b) Na caixa-de-ar (Projectista@, 2013b).....	24
Figura 4.14- Variação da temperatura ao longo do dia num elemento com isolamento pelo a) Exterior; b) Interior (Lanham et al., 2004).....	24
Figura 4.15- a) Variação da temperatura anual na camada de impermeabilização; b) Exemplo de cobertura invertida (Projectista@, 2013a).....	25
Figura 4.16- Corte térmico.	27
Figura 4.17- Impermeabilidade ao ar (Passivhaus Institut@, 2013).	27
Figura 5.1- Modelo da moradia Mini-Haven: a) Fachada Norte; b) Fachada Sul.....	27
Figura 5.2- Moradia Mini-Haven.....	28
Figura 5.3- Variação horária da temperatura em Coimbra (IWEC).	29
Figura 5.4- Variação horária da humidade relativa em Coimbra (IWEC).....	29
Figura 5.5- Variação horária da radiação, em W/m^2 , medida em plano horizontal externo em Coimbra (IWEC).	30
Figura 5.6- Frequência em hertz, velocidade em km/h e direcção do vento em Coimbra (IWEC).....	30
Figura 5.7- Comparação entre os resultados obtidos por diferentes softwares (Judkoff, Polly, Bianchi, Neymark and Kennedy, 2011).....	32
Figura 5.8- Isolamento térmico adoptado na análise base para: a) Cobertura; b) Pavimento. 34	
Figura 5.9- Isolamento térmico adoptado na análise base para: a) Paredes exteriores; b) Paredes interiores.....	34
Figura 5.10- Fluxo térmico na: a) Parede exterior; b) Cobertura.	36
Figura 5.11- Variação horária da temperatura interior [°C].	38
Figura 5.12- Variação horária da humidade relativa interior [%].	38
Figura 5.13- Variação horária dos ganhos internos de calor devido a radiação solar directa, aquecimento mecânico e arrefecimento mecânico [kWh].	39
Figura 5.14- Ganhos anuais de calor [kWh/m^2 ano].....	39
Figura 5.15- Balanço de calor diário devido a infiltrações e ventilação natural [kWh/dia]. ..	40
Figura 5.16- Balanço de calor diário pelo pavimento e cobertura [kWh/dia].	40
Figura 5.17- Balanço de calor diário pelos envidraçados e paredes exteriores [kWh/dia].	41
Figura 5.18- Balanço de calor anual pela envolvente exterior [kWh/m^2 ano].	41
Figura 5.19- Tipo de consumo anual de energia [kWh/m^2 ano].....	42
Figura 5.20- Influência da orientação do edifício no consumo de energia útil [kWh/m^2 ano]. 43	
Figura 5.21- Influência do nível de isolamento no consumo de energia útil [kWh/m^2 ano]. ..	44
Figura 5.22- Influência dos envidraçados no consumo de energia útil [kWh/m^2 ano].....	46

Figura 5.23- Influência dos vidros duplos baixos emissivos no nível de isolamento térmico [kWh/m ² ano].	47
Figura 5.24- Influência do sistema de ventilação no consumo de energia útil [kWh/m ² ano].	48
Figura 5.25- Influência da impermeabilidade ao ar no consumo de energia útil [kWh/m ² ano].	49
Figura 5.26- Alteração do isolamento térmico em relação à análise base na: a) Parede exterior; b) Cobertura.....	49
Figura 5.27- Influência da inércia térmica no consumo de energia útil [kWh/m ² ano]......	50
Figura 5.28- Emissões de dióxido de carbono para os diferentes casos [kg/ano].	51
Figura 5.29- Consumo de energia incorporada e operacional durante a vida útil (50 anos) para a análise base [MJ/m ²].	52
Figura C.1- Ocupação durante a semana da cozinha/sala [Número de ocupantes].	C-1
Figura C.2- Ocupação durante a semana do quarto [Número de ocupantes].	C-1
Figura C.3- Ocupação durante a semana da casa de banho [Número de ocupantes].	C-1
Figura C.4- Ocupação durante o fim-de-semana da cozinha/sala [Número de ocupantes]. ..	C-2
Figura C.5- Ocupação durante o fim-de-semana do quarto [Número de ocupantes].	C-2
Figura C.6- Ocupação durante o fim-de-semana da casa de banho [Número de ocupante ...	C-2

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 2.1- Normas Europeias para a construção de casas passivas.	7
Quadro 2.2- Valores permitidos pelo RCCTE para o caso de estudo.....	7
Quadro 3.1- Comparação entre os custos de casas tradicionais e casas “Passivhaus” (Passive-On Project, 2007c).....	10
Quadro 3.2- Comparação entre casas tradicionais e casas “Passivhaus” (Passive-On Project, 2007c).....	11
Quadro 5.1- Descrição da moradia Mini-Haven.....	28
Quadro 5.2- Tipo de ocupação.	31
Quadro 5.3- Aquecimento e arrefecimento mecânico.	33
Quadro 5.4- Isolamento térmico adoptado na análise base.....	34
Quadro 5.5- Resistências térmicas superficiais de acordo com o RCCTE.	35
Quadro 5.6- Resistências térmicas das caixas-de-ar de acordo com o RCCTE.....	35
Quadro 5.7- Janelas adoptadas na análise base.	37
Quadro 5.8- Portas adoptadas.....	37
Quadro 5.9- Ponto de condensação.....	37
Quadro 5.10- Orientação dos envidraçados nos diferentes casos.....	42
Quadro 5.11- Variação do nível de isolamento da envolvente exterior.....	43
Quadro 5.12- Efeito das pontes térmicas na cobertura e paredes exteriores.....	45
Quadro 5.13- Variação dos envidraçados.	45
Quadro 5.14- Vidro duplo baixo emissivo com argon.....	46
Quadro 5.15- Consumo de energia incorporada e operacional durante a vida útil (50 anos) para diferentes casos.	52
Quadro D.1- Quantidades de materiais utilizadas para o calculo da energia incorporada....	D-1

ABREVIATURAS

EPBD – *Energy Performance of Buildings Directive*

DGEG – Direcção Geral de Energia e Geologia

EPS – *Expanded PolyStyrene* (Poliestireno expandido)

XPS – *Extruded PolyStyrene* Poliestireno extrudido

PUF – *PolyUrethane Foam* (Espuma de poliuretano)

ICB – *Insulation Cork Board* (Aglomerado de cortiça)

MW – *Mineral Wool* (Lã mineral)

PVC – *PolyVinyl Chloride* (Policloreto de polivinila)

PHI – *PassivHaus Institut*

INETI – Instituto Nacional de Energia, Tecnologia e Inovação

CO₂ – Dióxido de Carbono

PHPP – *Passive House Planning Package* (Pacote de Planeamento de Casa Passiva)

DOE – *USA Department of Energy*

NREL – *National Renewable Energy Laboratory*

RCCTE – Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios

COP – *Coefficient Of Performance* (Coeficiente de desempenho)

IWEC – *International Weather for Energy Calculations*

1 INTRODUÇÃO

1.1 Enquadramento do tema

O aquecimento global, a instabilidade associada aos preços do petróleo e gás, a grande dependência e escassez de combustíveis fósseis (petróleo, carvão mineral e gás natural) na maior parte de países, o aumento do consumo deste tipo de combustíveis, para satisfazer condições de conforto interior dos edifícios cada vez mais exigentes, tem levado a uma nova abordagem ao processo construtivo.

Da evolução dos edifícios tradicionais, em que aparelhos eléctricos e mecânicos de aquecimento, arrefecimento, ventilação e iluminação são usados correntemente, sem grandes preocupações ambientais, tem surgido um conceito de edifício, onde impera o uso de sistemas de aproveitamento de fontes naturais de energia, como o sol e o vento, e a arquitectura para além de contribuir para o sentido estético e conforto, tem também uma grande influência no aproveitamento energético.

A aposta neste conceito de edifício, de baixo consumo ou passivo, é um passo importante para reduzir as emissões de dióxido de carbono, de modo a ir ao encontro do Protocolo de Quioto, diminuir a dependência energética de um País, e cumprir a regulamentação Europeia, em particular a Directiva Europeia para o Desempenho Energético dos Edifícios (EPBD), onde se exige que todos os edifícios, novos ou renovados, tenham necessidades de energia quase nulas a partir de 2020, em todos os países Europeus.

Com a construção anual de aproximadamente 2,5 milhões de casas na Europa, e sendo o sector dos edifícios responsável por 27% da energia final (energia como é disponibilizada, na forma de electricidade, gás, etc.) consumida na União Europeia, torna-se claro que para reduzir as emissões de CO₂ e atingir as metas do protocolo de Quioto, onde é assumido o compromisso da União Europeia em baixar os níveis de emissão de CO₂ em 2020 para níveis 20% inferiores aos de 1990, será necessária a aposta em casas de baixo consumo (Passive-On Project, 2007a). Exemplo disso é o caso alemão onde as emissões de CO₂ podiam ser estabilizadas em 2020 se 50% das casas recuperadas e 70% das casas construídas cumprissem a norma Passivhaus. Já para estabilizar as emissões de CO₂ do sector residencial Europeu seria necessário que entre as casas construídas ou recuperadas, dez mil cumprissem a norma Passivhaus (Passive-On Project, 2007a).

Em Portugal o consumo de energia do sector residencial é aproximadamente 17,7% da energia final consumida no País e este sector é responsável pela emissão de 2,5 milhões de toneladas de CO₂ anualmente (DGEG, 2011).

Os 17,7% de energia consumida pelo sector residencial repartem-se por (DGEG, 2011):

62,6% em cozinhas e águas quentes sanitárias, 22% em aquecimento e arrefecimento do espaço interior e 15,4% em iluminação e equipamentos electrodomésticos. O que permite concluir que a fonte de energia associada à produção de águas quentes sanitárias, maioritariamente o gás e a electricidade, pode passar para uma fonte de energia renovável (solar, eólica, geotérmica), e os consumos associados ao aquecimento e arrefecimento do espaço interior podem ser diminuídos recorrendo a estratégias passivas (Isolani, 2008).

1.2 Objectivos

Com este trabalho pretende-se numa primeira fase demonstrar a importância das casas passivas para a diminuição da factura energética e das emissões de dióxido de carbono.

De seguida pretende-se enquadrar as casas “Passivhaus” no mercado imobiliário, descrevendo os tipos de casas existentes, e a evolução do processo construtivo até chegar-se às casas “Passivhaus”. Nesta fase serão abordados alguns dos diferentes sistemas passivos e activos de aquecimento e arrefecimento existentes.

Por último, procura-se aplicar os sistemas passivos e activos a um caso de estudo de forma a modelar uma casa que cumpra a norma “Passivhaus”. Nesta fase serão verificadas quais as características construtivas necessárias para o cumprimento da norma Passivhaus, como a espessura do isolamento térmico, o tipo de vidros e de ventilação (natural ou mecânica).

1.3 Organização da Dissertação

Este trabalho é constituído por seis capítulos. O primeiro capítulo destina-se aos objectivos propostos para o trabalho, organização da tese e ao enquadramento do tema onde é explicado a importância das casas passivas.

No segundo capítulo expõem-se diferentes conceitos de casas, desde as casas tradicionais até às casas “Passivhaus”.

No terceiro capítulo descreve-se a perspectiva histórica das casas passivas na Europa e em Portugal.

No quarto capítulo apresentam-se alguns dos métodos e sistemas que permitem a construção de casas passivas.

No quinto capítulo apresenta-se um caso de estudo de uma casa “Passivhaus”, para o distrito de Coimbra, a sua análise paramétrica e a respectiva análise dos resultados obtidos.

No sexto capítulo, e último, apresentam-se as conclusões obtidas neste trabalho e desenvolvimentos futuros.

2 DIFERENTES CONCEITOS DE CASAS

Neste capítulo pretende-se descrever os diferentes tipos de casas existentes no mercado imobiliário, desde as casas tradicionais até às casas “Passivhaus”, e indicar quais os requisitos que são necessários cumprir para que uma casa possa ser classificada como “Passivhaus”.

2.1 Casas tradicionais

As casas tradicionais são construídas de acordo com a prática comum de um país num período específico e satisfazem apenas os requisitos mínimos de consumo de energia exigidos (Audenaert et al., 2008).

Utilizam técnicas passivas de aquecimento e arrefecimento apenas por estas se encontrarem enraizadas no processo construtivo, como seja o uso de paredes exteriores pintadas de branco para arrefecer o edifício no verão e o uso de janelas convencionais de modo a proporcionar ventilação e iluminação natural. Em grande parte dos casos têm isolamento térmico insuficiente.

2.2 Casas de reduzido consumo energético

As casas de baixo consumo de energia são projectadas de modo a minimizar o consumo de energia durante a vida útil do edifício (Audenaert et al., 2008), recorrendo de forma sustentada a técnicas passivas, por exemplo através do estudo da melhor orientação para as fachadas ou o uso de grandes vãos envidraçados na fachada Sul (no hemisfério Norte).

No entanto, ao longo do período de vida útil das casas de baixo consumo pode ser necessário o recurso a sistemas convencionais de aquecimento e arrefecimento, como seja o uso do ar condicionado.

2.3 Casas passivas

As casas passivas são um tipo de edifício de baixo consumo, onde a necessidade de energia é quase nula (mas não há parâmetros a cumprir), orientado para explorar ao máximo a arquitectura passiva e sistemas passivos (Figura 2.1) que fornecem luz, aquecimento, arrefecimento e ventilação de modo a assegurar um clima interior confortável durante o verão e Inverno, sem necessidade de sistemas convencionais de aquecimento e arrefecimento exigidos (Audenaert et al., 2008).

Não sendo possível estabelecer as condições de conforto exclusivamente através de técnicas passivas, por vezes estas casas têm incorporado sistemas activos de baixo consumo

energético, como colectores solares e bombas de calor geotérmicas (Passive-On Project, 2007a).

Idealmente o consumo energético dos sistemas activos é suficientemente baixo para que possa ser viável económica e tecnicamente o uso de energias renováveis (por exemplo através de painéis fotovoltaicos) para fornecer essa energia (Cardoso et al., 2011).



Figura 2.1- Casas passivas em: a) Budapeste, Hungria (Mendonça, 2005); b) Porto Santo, Portugal (Gonçalves et al., 2004).

2.4 Casas “Passivhaus”

As casas “Passivhaus” (Figura 2.2) são um tipo de casas passivas projectadas de modo cumprir os requisitos da norma alemã Passivhaus.



Figura 2.2- Casas “Passivhaus” em: a) Ganderkese, Alemanha; b) Cherasco, Itália (Passive-On Project, 2007c).

Na construção deste tipo de edifícios são utilizados elementos construtivos (isolamento térmico, janelas, portas, etc.) que permitam ter um baixo consumo energético e são usadas fontes de calor gratuitas, como a radiação solar directa e o calor libertado pelos habitantes (Brandão, 2008).

O edifício pode possuir um sistema de ventilação mecânica com uma unidade de recuperação de calor que permita garantir os requisitos da qualidade do ar interior. Este sistema por vezes é necessário porque estas casas são muito isoladas e têm uma grande estanquidade às

infiltrações de ar, o que pode tornar a ventilação através da abertura de janelas insuficiente (Brandão, 2008).

O isolamento das casas “Passivhaus” do centro da Europa varia entre os 50cm e os 90cm de espessura, passando estes valores para cerca de metade nos edifícios do Sul da Europa (Ascenso, 2011).

Na figura seguinte (Figura 2.3) é feita a comparação entre o consumo de energia primária (como está disponível na natureza, por exemplo o carvão), final (como é fornecida ao utilizador sob a forma de electricidade, gás, etc.) e útil (aproveitada pelo utilizador sob a forma de iluminação, calor, etc.) para uma casa tradicional (caso de referencia) e uma casa “Passivhaus” (CEPHEUS). Nessa figura (Figura 2.3) pode-se observar a redução energética obtida pela casa “Passivhaus”.

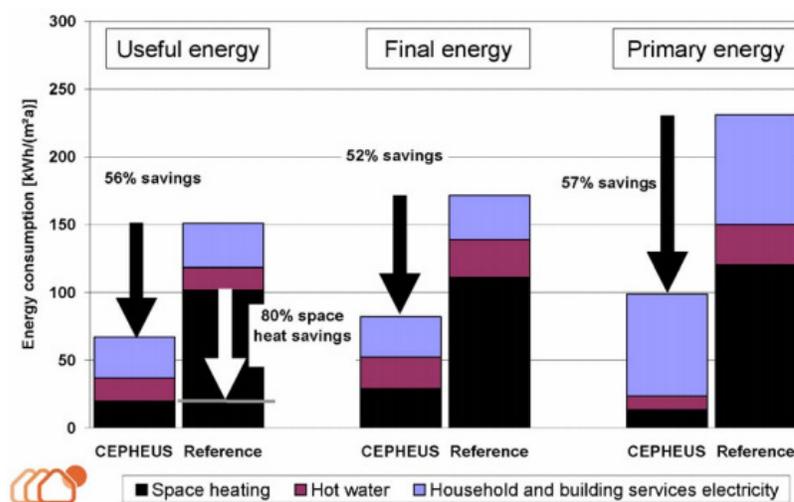


Figura 2.3- Comparação entre o consumo de energia de uma casa tradicional (Reference) e uma casa “Passivhaus” (CEPHEUS) (Schnieders et al., 2006).

2.4.1 Norma Passivhaus

As casas “Passivhaus” têm como princípio o uso de isolamento térmico para manter o calor desejado dentro do edifício e o indesejado fora deste, um sistema de ventilação que forneça constantemente ar novo ao edifício e quando necessário, um sistema de recuperação de calor que reutilize o calor existente no ar extraído (Cardoso et al., 2011). De modo a cumprir estes princípios o instituto Alemão *Passivhaus institut* (PHI) que criou a norma Passivhaus e tendo em conta o clima onde se insere o edifício, estabelece as seguintes medidas (Passive-On Project, 2007b e Passivhaus Institut@, 2013):

- Climatização do espaço interior para a Europa do Norte: As necessidades úteis de aquecimento não podem exceder o limite de 15 kWh/m²ano de área útil e devem ser calculadas de acordo com o software *Passive House Planning Package* (PHPP);
- Climatização do espaço interior para a Europa do Sul: As necessidades úteis de aquecimento não podem exceder 15 kWh/m²ano de área útil e as necessidades de

arrefecimento não podem exceder 15 kWh/m²ano de área útil e devem ser calculadas de acordo com o software *Passive House Planning Package* (PHPP);

- Energia primária: O consumo de energia primária de todos os serviços energéticos, incluindo os equipamentos eléctricos, não pode ser superior a 120 kWh/m²ano de área útil e deve ser calculado de acordo com o PHPP;
- Impermeabilidade ao ar para a Europa Central: A taxa de renovação horária do ar interior deve ser inferior a 0.6 rph (teste de pressurização a 50Pa feito de acordo com a com a norma EN 13829);
- Impermeabilidade ao ar para a Europa do Sul: Se não for utilizado um sistema de ventilação mecânico a taxa de renovação do ar interior deve ser inferior a 1 rph, caso contrário esta taxa deverá ser inferior a 0.6 rph (teste de pressurização a 50Pa feito de acordo com a com a norma EN 13829);
- Temperatura anual interior no Centro da Europa: A temperatura interior deve ser mantida acima dos 17°C. O sistema de ventilação utilizado para atingir esta temperatura deve produzir um ruído inferior a 25 dBA e ter uma taxa de eficiência (percentagem de calor reutilizado) mínima de 75%;
- Temperatura interior no Sul da Europa: Se existir um sistema de arrefecimento activo a temperatura deve ser mantida abaixo dos 26°C, caso não exista este sistema, deve ser mantida uma temperatura de conforto térmico (situada na banda de conforto térmico definida na norma EN 15251);
- Envidraçados no Centro da Europa: O coeficiente de transmissão térmica (U) das janelas deve ser inferior a 0.8 W/m²K;
- Envidraçados no Sul da Europa: Não existe coeficiente de transmissão térmica definido, o recomendado é que se usem vidros duplos;
- Envoltente exterior no Centro da Europa: O coeficiente de transmissão térmica (U) dos componentes opacos exteriores deve ser inferior a 0.15 W/m²K;
- Envoltente exterior no Sul da Europa: Não existe coeficiente de transmissão térmica definido para os componentes opacos, no entanto esse valor poderá ser superior ao praticado no Centro da Europa, já que as necessidades de isolamento no Sul da Europa são inferiores (cerca de metade).

2.5 Normas Europeias

No Sul da Europa, a definição de casa passiva está associada a qualquer tipo de edifício que contemple técnicas passivas, podendo ou não cumprir os requisitos da norma “Passivhaus”, enquanto que no centro da Europa o termo casa passiva está associado às casas que cumprem os requisitos da norma “Passivhaus” (Passive-On Project, 2007a). No entanto existem diversos países onde estão estabelecidas normas para a construção de casas passivas, como na Suíça (Minergie), França (Effinergie) e Dinamarca (DK Low energy Class 1). Apresenta-se de seguida alguns valores dessas normas (Quadro 2.1), que conduzem a casas de consumo energético semelhante (Class1@, 2013; Effinergie@, 2013; Minergie@, 2013):

Quadro 2.1- Normas Europeias para a construção de casas passivas.

Valores máximos	Passivhaus do Centro da Europa	Passivhaus do Sul da Europa	Minergie	Effinergie	DK Low energy Class 1
Aquecimento do espaço interior [kWh/m ² ano]	15	15	-	-	-
Arrefecimento do espaço interior [kWh/m ² ano]	-	15	-	-	-
Energia primária para aquecimento, arrefecimento, ventilação, água quente [kWh/m ² ano]	-	-	42	-	35+1100/(Área a aquecer)
Energia primária para aquecimento, arrefecimento, ventilação, água quente e electrodomésticos [kWh/m ² ano]	120	120	-	-	-
Energia primária para aquecimento, arrefecimento, ventilação, água quente e iluminação [kWh/m ² ano]	-	-	-	50	-
Impermeabilidade ao ar [rph]	0,6	1,0	0,6	0,6	-
Envidraçados (U) [W/m ² K]	0,8	-	1,0	0,8	0,8
Envolvente exterior (U) [W/m ² K]	0,15	-	0,15	0,15	-

Já a regulamentação Portuguesa em vigor, o Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios (RCCTE), não conduz obrigatoriamente a uma solução passiva. Apresentam-se de seguida os valores máximos (RCCTE, 2006) permitidos pelo RCCTE para a análise base do capítulo 5 (Cálculos no ANEXO B).

Quadro 2.2- Valores permitidos pelo RCCTE para o caso de estudo.

Critério	RCCTE	
Consumo máximo de energia útil para aquecimento [kWh/m ² ano]	18,00	
Consumo máximo de energia útil para arrefecimento [kWh/m ² ano]	104,57	
Consumo máximo de energia útil para produção de água quente sanitária [kWh/m ² ano]	106,63	
Consumo global máximo de energia primária do edifício [Kgep/m ² ano]	15,51	
Valor médio da taxa de Permeabilidade ao ar [rph]	0,6	
Envolvente exterior ($U_{máx}$) [W/m ² C]	Paredes	1,8
	Cobertura	1,25
	Pavimento	1,65
Factores solares de vãos envidraçados (g_{\perp}) [-]	0,56	
Temperatura interior máxima na estação de aquecimento [°C]	20	
Temperatura interior mínima na estação de arrefecimento [°C]	25	
Humidade relativa na estação de arrefecimento [%]	50	

3 PERSPECTIVA HISTÓRICA DAS CASAS PASSIVAS

Neste capítulo pretende-se descrever a evolução do mercado imobiliário e enumerar alguns aspectos que são necessários melhorar no futuro.

3.1 Casas passivas na Europa

O conceito de casa passiva surge durante a década 70, devido à crise do petróleo que despertou para a necessidade de diminuir a dependência dos combustíveis fósseis e tirar maior partido das energias renováveis (Passive-On Project, 2007c). Nos anos 90 a questão tomou um novo impulso devido ao aquecimento global. Mas apesar do conceito de casa passiva ter apenas surgido nos anos 70, muitas das medidas adoptadas nestas casas já eram aplicadas empiricamente na arquitectura tradicional, respeitando as restrições e adaptando as casas ao local onde estas eram construídas. Tais medidas podem ser comprovadas pelas ruas estreitas do bairro de Santa Cruz em Sevilha, onde a proximidade das fachadas situadas em lados opostos da rua, criava um efeito de sombreamento de modo a arrefecer as casas durante o Verão (Figura 3.1).



Figura 3.1- Rua estreita do bairro de Santa Cruz em Sevilha, Espanha (Passive-On Project, 2007a).

Da evolução do conceito das casas passivas iniciais que continham uma arquitectura diferente das casas tradicionais (tendo paredes muito espessas, paredes Trombe, estufas), surgiram as casas “Pativhaus”, onde o projecto de arquitectura quase não se distingue das casas tradicionais e partindo do princípio, que quanto mais isolado termicamente for o edifício, menor quantidade de aquecimento será necessário. Este tipo de construção surgiu na década

70, nos Estados Unidos da América, quando foram feitos vários estudos sobre casas muito isoladas (Cardoso et al., 2011). Em 1991 com base nesses estudos, um grupo de investigadores alemães criou um edifício em Darmstadt na Alemanha (Figura 3.2), demonstrativo de uma casa de custo razoável (custou mais 14% do que uma casa tradicional (Cardoso et al., 2011)) e baixo consumo energético, para o clima Alemão. Novamente na Alemanha e devido ao sucesso obtido, em 1995, foram aplicados os mesmos princípios passivos na construção de uma casa em Groß-Umstadt. No mesmo ano, em 1995, e com base nos resultados obtidos começou a desenhar-se o que viria a dar origem à norma alemã “Passivhaus”, criada pelo investigador alemão Wolfgang Feist (Passive-On Project, 2007c).



Figura 3.2- Primeira casa “Passivhaus” (Schnieders, 2006).

Um ano mais tarde, em 1996, foi criado o instituto Alemão, *Passivhaus Institut* (PHI), que se dedicava inicialmente à investigação e desenvolvimento do uso eficiente de energia nos edifícios dos países do Centro da Europa, em particular da Alemanha (Passive-On Project, 2007c).

Em 1998 a Comissão Europeia criou o projecto CEPHEUS, que contemplou a construção de 221 casas “Passivhaus”, em quatro países (Alemanha, Áustria, Suécia e Suíça) e a avaliação do desempenho dessas casas. Para tal foram quantificados parâmetros como a temperatura interior durante o Inverno e Verão, consumo de energia para aquecimento, consumo de energia para a produção de águas quentes sanitárias, qualidade do ar interior, consumo de electricidade, consumo de energia primária, custos e satisfação dos ocupantes (Schnieders et al., 2006).

Devido ao sucesso do projecto, em 2007 já havia 6.000 edifícios classificados como “Passivhaus”, principalmente situados nos países onde ocorreu tal projecto (Passive-On Project, 2007a).

Inicialmente a norma Passivhaus, foi desenvolvida tendo em conta o clima dos países do centro da Europa, considerando apenas as necessidades de aquecimento (Passive-On Project, 2007a). Dai, em 2007, financiado pelo Programa Energia Inteligente Europa, surgiu o

projecto PASSIVE-ON, onde se analisou a aplicação da norma aos países do Sul, como Portugal, Espanha e Itália. Este projecto propôs alterações à norma Alemã de modo a que esta fosse adaptada a climas mais quentes, em especial, foi proposto a inclusão de necessidades energéticas para arrefecimento (Passive-On Project, 2007a).

Em 2011 existiam cerca de 32.000 casas classificadas como “Passivhaus” por toda a Europa (Passive house international@, 2013) e a norma Passivhaus, com as necessidades de arrefecimento incluídas, já era obrigatória em algumas regiões da Alemanha, como Frankfurt e na Áustria.

Actualmente uma casa “Passivhaus” custa entre 3% e 10% mais do que uma casa tradicional (Quadro 3.1), apesar de haver casos em que foi possível a construção deste tipo de casas pelo mesmo preço das casas tradicionais (Passive-On Project, 2007a).

Quadro 3.1- Comparação entre os custos de casas tradicionais e casas “Passivhaus” (Passive-On Project, 2007c).

	Custos médios de construção		Custos extra das casas “Passivhaus”	
	Casa tradicional [Euro/m ²]	Casa “Passivhaus” [Euro/m ²]	[Euro/m ²]	[%]
Alemanha	1,100	1,203	103	9%
Itália (Milão)	1,400	1,494	94	6,71%
França	1,200	1,260	60	5%
Espanha (Sevilha)	720	740,5	24,1	2,85%
Reino Unido	1,317	1390	73	5,54%

Este custo extra, geralmente é recuperado em menos de 20 anos, devido à poupança em energia (gás e electricidade), já que em média uma casa “Passivhaus” construída na Europa, tem um consumo total de energia 50% inferior a uma casa tradicional (Schnieders et al., 2006) e apenas necessita de 15% a 20% (Quadro 3.2) da energia requerida para aquecer a casa (Passive-On Project, 2007a).

No quadro seguinte (Quadro 3.2) podem-se confirmar essas percentagens e ainda se retira que os custos extras são mais elevados nos países com climas frios (Reino Unido e Alemanha), devido à sua maior necessidade de isolamento e de sistemas activos de aquecimento enquanto no Sul da Europa, esses sistemas de aquecimento não são tão necessários e as necessidades de arrefecimento podem ser quase totalmente suprimidas através do uso de soluções passivas.

A percentagem de poupança energética é semelhante em todos os países e situa-se aproximadamente entre os 40% e 65%. No Reino Unido essa percentagem baixa para 26,4% devido ao ceticismo dos seus habitantes em relação aos sistemas de ventilação mecânica com recuperação de calor, sendo a ventilação controlada pela abertura de janelas (Passive-On Project, 2007c).

A análise do custo do ciclo de vida inclui todas as despesas com aquisição e manutenção da casa ao longo de um período (10 anos e 20 anos), o que varia consoante o mercado imobiliário, estilo de vida e preços de energia de cada País.

O período de retorno é sempre inferior a 20 anos e é tanto menor quanto mais a Sul da Europa se situa a casa, o que se explica pelo menor custo extra inicial das casas nestes países (têm espessuras de isolamento térmico menores e na maior parte dos casos não é necessário um sistema de ventilação mecânico com recuperação de calor).

Quadro 3.2- Comparação entre casas tradicionais e casas “Passivhaus” (Passive-On Project, 2007c).

	França	Alemanha	Itália	Espanha (Granada)	Espanha (Sevilha)	Reino Unido	
Custo Extra inicial [Euros/m ²]	103	94	60	21,4	20,5	73	
Custo Extra inicial [%]	9%	6,71%	5%	3,35%	2,85%	5,54%	
Poupança Energética total [kWh/m ² .ano]	55	75	86	65,5	37,6	39,7	
Poupança Energética total [%]	45%	50%	65,4%	57,3%	40,7%	26,4%	
Análise do custo para um ciclo de vida de 10 anos [€]	Casa Tradicional	143,731	184,716	193,817	101,828	98,385	108,337
	Casa “Passivhaus”	152,621	190,104	190,437	95,676	96,100	111,988
Análise do custo para um ciclo de vida de 20 anos [€]	Casa Tradicional	160,343	204,942	221,148	117,928	108,682	117,875
	Casa “Passivhaus”	160,552	200,579	198,458	103,647	102,290	117,256
Quociente Custo/Benefício 10 anos	-0,72	-0,48	0,39	2,13	0,93	-0,65	
Quociente Custo/Benefício 20 anos	0,02	0,39	2,63	4,96	2,60	0,11	
Período de retorno do capital [anos]	19,5	19	8	4	5	19	

3.2 Casas passivas em Portugal

Como no resto da Europa também a arquitectura tradicional portuguesa utilizava sistemas de aquecimento e arrefecimento passivos. Exemplo disso são as casas construídas no Norte de Portugal com paredes em pedra e onde o piso térreo era ocupado por animais, de modo a aquecer o piso superior durante o Inverno. Já as casas do Sul, onde as temperaturas são mais elevadas, as paredes eram pintadas de branco e as janelas recuadas em relação à parede, de forma a criar sombreamento (Figura 3.3).



Figura 3.3- Casa tradicional em Setúbal, Portugal (Gonçalves et al., 2004).

Só a partir dos anos 90, e seguindo o desenvolvimento da Europa, é que as casas passivas tiveram maior divulgação em Portugal, com a construção da primeira casa do género nessa altura (Ascenso, 2011). O projecto foi liderado pela Faculdade de Engenharia do Porto, no Campus de Ramalde do Instituto Nacional de Engenharia, Tecnologia e Inovação (INETI). Nessa casa a inércia térmica tinha um papel fundamental, eram utilizadas paredes Trombe e o isolamento térmico colocado pelo exterior foi utilizado pela primeira vez em Portugal (Ascenso, 2011).

Em 2007, no projecto PASSIVE-ON, modelou-se uma casa “Passivhaus”, para a zona de Lisboa, de modo a comparar este tipo de casas com as tradicionais. Verificando-se as vantagens energéticas das casas “Passivhaus”, em relação às casas projectadas segundo o RCCTE (Figura 3.4).

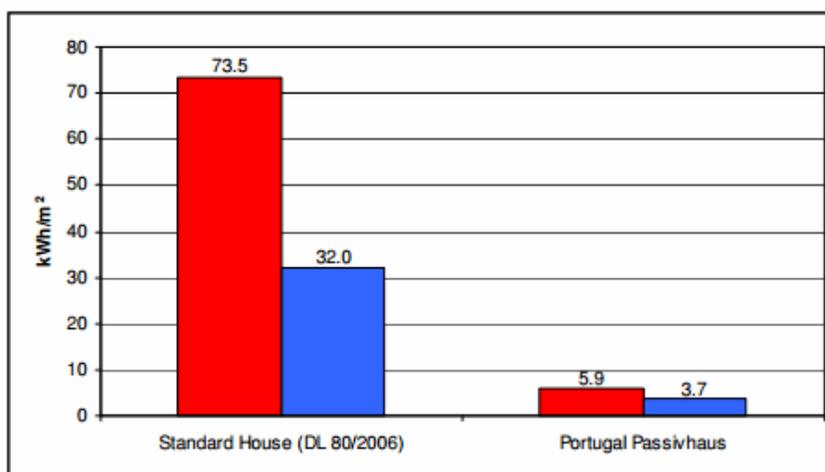


Figura 3.4- Necessidades de aquecimento (vermelho) e arrefecimento (azul) de uma casa tradicional (Construída cumprindo os mínimos do RCCTE) e de uma casa “Passivhaus” em Lisboa (Passive-On Project, 2007c).

Em 2008, um ano após ter surgido o projecto PASSIV-ON, começou a ser planeada a primeira casa portuguesa (Figura 3.5) classificada como “Passivhaus”, (a construção teve início em 2011 no município de Ílhavo).



Figura 3.5- Primeira casa “Passivhaus” portuguesa (Cardoso et al., 2011).

3.3 Casas passivas no futuro

De modo a desenvolver o conceito de casa passiva de forma sustentável, o projecto PASSIVE-ON, identificou alguns aspectos a melhorar, como seja o desenho passivo tornar-se parte integrante do currículo dos arquitectos, e não uma matéria auxiliar, os construtores melhorarem o seu conhecimento em relação a este tipo de edifício, de modo a implantar correctamente os sistemas de baixo consumo, a revisão dos regulamentos nacionais de modo a tornar menos restritivas as necessidades de arrefecimento, que tornam quase obrigatório o uso de ar condicionado, os empréstimos bancários para compra de casa serem financiados tendo em conta a diminuição de encargos mensais dos proprietários com a energia para luz, água, aquecimento, arrefecimento. Outro aspecto apontado, e já em desenvolvimento, é o melhoramento do sistema de certificação para as casas “Passivhaus”, e a sua maior extensão a produtos, actualmente são maioritariamente alemães, (janelas, isolamento, etc.) e também o aumento do número de intervenientes certificados (arquitectos, construtores, etc.) na construção deste tipo de casas. Tais medidas podem contribuir para diminuição de casas construídas com pouca qualidade e o desenvolvimento de um mercado de casas “Passivhaus” (Passive-On Project, 2007a).

4 CONCEPÇÃO E CONSTRUÇÃO DE CASAS PASSIVAS

Neste capítulo pretende-se descrever alguns dos sistemas (passivos e activos) que permitem a construção de casas passivas e algumas técnicas de execução (orientação do edifício, colocação do isolamento térmico, etc.) deste tipo de casas.

4.1 Sistemas passivos de aquecimento

Os sistemas passivos permitem tirar proveito dos fluxos naturais de energia, como o vento e a radiação solar através de considerações como o clima local, orientação do edifício, características do terreno e não recorrem ao uso de equipamentos mecânicos. São parte integrante dos edifícios e podem funcionar como colectores e acumuladores de energia solar (Gonçalves et al., 2011).

Os sistemas passivos de aquecimento consistem em sistemas de ganho directo, sistemas de ganho indirecto e sistemas de ganho isolado.

4.1.1 Sistemas de ganho directo

O sistema de ganho directo (Figura 4.1) consiste na incidência solar nos espaços a aquecer e nas massas térmicas envolventes (paredes e pavimentos), que durante o período diurno armazenam o calor da incidência solar, para posteriormente no período nocturno devolverem esse calor ao espaço interior (Gonçalves et al., 2004).

Quanto maior for a massa térmica menor será a variação de temperatura interior, mas também será mais difícil aquecer o edifício. Em Portugal os edifícios geralmente têm massa térmica suficiente devido ao uso de paredes duplas e lajes maciças (Gonçalves et al.).

As vantagens deste sistema são o seu custo reduzido, simplicidade do processo de funcionamento e a flexibilidade permitida na escolha da solução arquitectónica. As maiores desvantagens são a perda de privacidade quando se opta por grandes vãos envidraçados, o sobreaquecimento que pode ocorrer nos dias de maior calor e a necessidade de incidência solar directa (Mendonça, 2005).

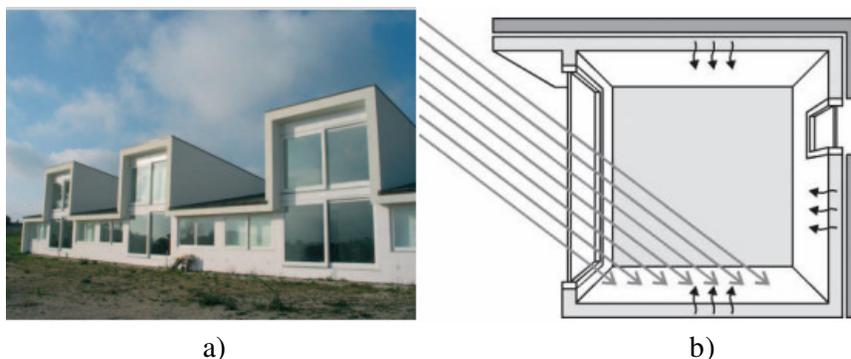


Figura 4.1- a) Sistema de ganho directo; b) Esquema de funcionamento (Gonçalves et al., 2004).

4.1.2 Sistemas de ganho indirecto

Para ultrapassar a dependência das horas solares a que os sistemas de ganho directo estão sujeitos, utilizam-se correntemente sistemas que captam e acumulam a energia solar, que posteriormente é transmitida ao interior do edifício através de condução pelo sistema que acumula a energia ou convecção no caso de existir uma abertura entre o espaço a aquecer e o sistema de acumulação de energia (Gonçalves et al., 2004).

Os sistemas de ganho indirecto mais utilizados são as paredes de água (onde a água é o elemento de armazenamento térmico), coberturas de água e paredes Trombe.

As paredes Trombe (Figura 4.2) são compostas por um vão envidraçado, uma caixa-de-ar e uma parede de betão que, na face exterior, é pintada com uma cor escura para maximizar a absorção de energia solar, contribuindo para o aquecimento (uma cor escura absorve cerca de 90% da radiação incidente). Quando os raios solares atravessam o vão envidraçado, a parede Trombe funciona como uma estufa, acumulando na caixa-de-ar o calor fornecido pela energia solar. Este calor acumulado vai aquecendo a parede de betão e penetrar até a face interior do edifício (Mendonça, 2005).

A grande dificuldade deste sistema é a sua correcta execução, mas quando bem executado permite satisfazer até 15% do consumo da energia para aquecimento (Mendonça, 2005).

O funcionamento das paredes de água é semelhante às paredes Trombe, trocando a caixa-de-ar e vidros por contentores de cor escura preenchidos com água (Mendonça, 2005).

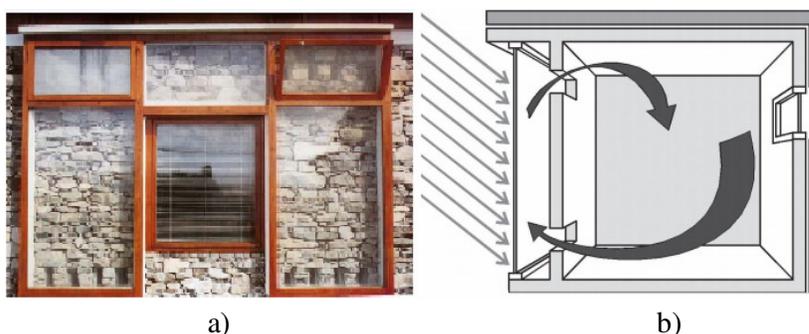
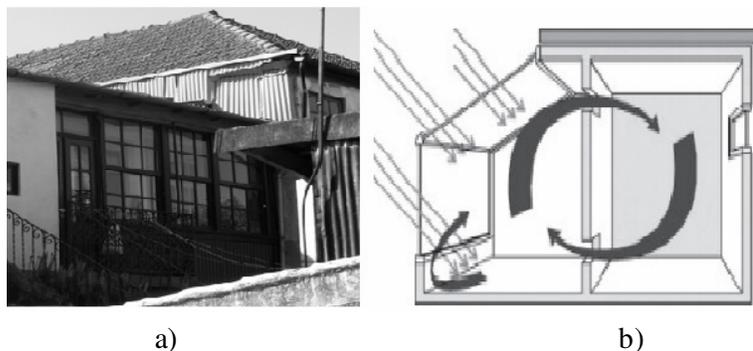


Figura 4.2- a) Paredes Trombe; b) Esquema de funcionamento (Gonçalves et al., 2004).

4.1.3 Sistemas de ganho isolado

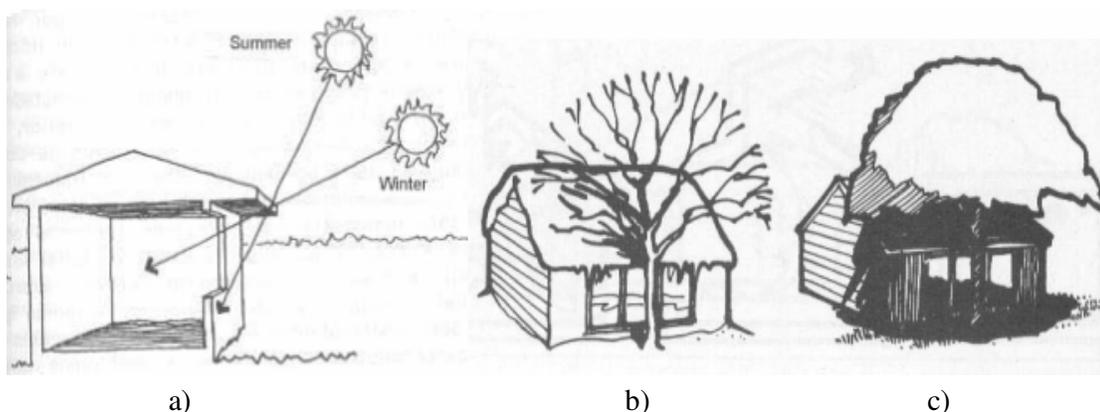
Nos sistemas de ganhos isolados a captação dos ganhos solares e o sistema de armazenamento térmico encontram-se separados das áreas dos edifícios a climatizar.

As estufas (Figura 4.3) são os sistemas de ganhos isolados mais utilizados. A grande vantagem deste sistema é a pequena variação de temperatura que ocorre ao longo do dia nos espaços adjacentes às estufas. As grandes desvantagens são o seu preço e grande oscilação de temperaturas dentro da estufa, tornando-a inabitável (Mendonça, 2005).



4.2 Sistemas passivos de arrefecimento

A técnica mais simples e eficaz de arrefecimento passivo consiste em impedir a radiação solar directa de entrar no edifício (Figura 4.4), o que pode ser conseguido através da colocação de palas e estores pelo lado exterior das zonas envidraçadas, vegetação plantada para criar sombreamento, utilização de cores claras e metalizadas nas fachadas (reflectem cerca de 80% da radiação solar para o ambiente), paredes exteriores de grande massa térmica com colocação de isolamento pelo exterior.



Outros dos sistemas de arrefecimento passivo utilizados são (Gonçalves et al., 2004):

4.2.1 Ventilação cruzada

De modo a aproveitar a ventilação natural, as janelas de paredes opostas devem ser colocadas no sentido dos ventos locais permitindo a entrada e saída do ar, o que contribui para a circulação do ar e diminuição da temperatura interior do edifício.

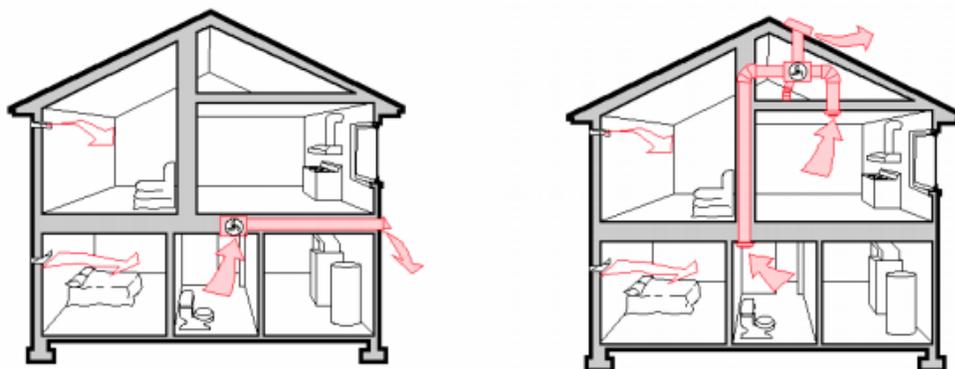


Figura 4.5- Esquema de funcionamento da ventilação cruzada (Passivhaus Institut@, 2013).

4.2.2 Arrefecimento pelo solo

O arrefecimento pelo solo é conseguido através da colocação de pisos subterrâneos em contacto com o solo, ou por entrada de ar no edifício através de um conjunto de condutas, colocadas até três metros da superfície do solo, que transferem o ar do solo (que se encontra a menor temperatura que o ar no edifício) para o interior do edifício (Figura 4.6).

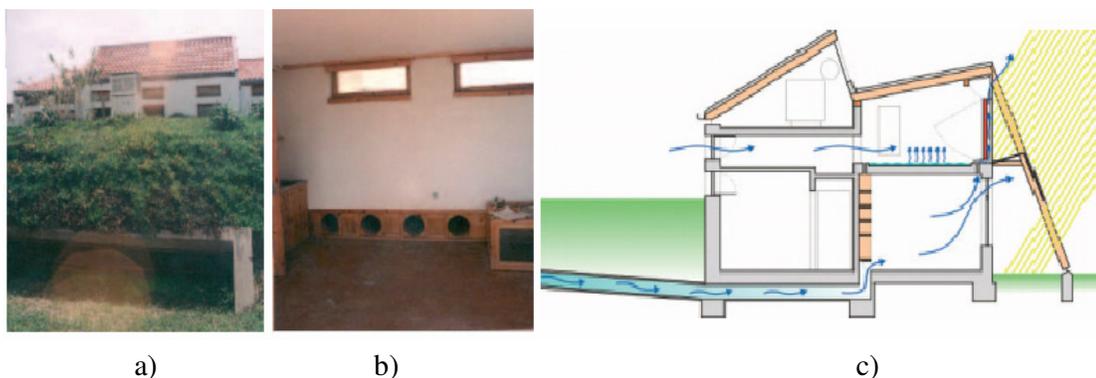


Figura 4.6- Entrada de ar: a) No exterior do edifício; b) No interior do edifício; c) Esquema de funcionamento (Gonçalves et al., 2004).

4.2.3 Arrefecimento evaporativo

O processo de arrefecimento evaporativo mais comum é conseguido através da colocação de espelhos de água próximos dos edifícios, arrefecendo assim o ambiente exterior e consequentemente o ar que entra no edifício (Figura 4.7).



Figura 4.7- a) Sistema evaporativo; b) Esquema de funcionamento (Patrocínio, 2006).

4.2.4 Arrefecimento radiativo

Durante o período nocturno estes sistemas removem o calor dos elementos exteriores do edifício (especialmente da cobertura, por se encontrar mais exposta ao céu) através da troca de radiação entre estes elementos e o céu (Figura 4.8).

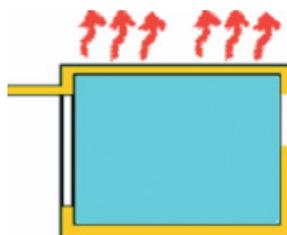


Figura 4.8- Esquema de funcionamento do arrefecimento radiativo (Gonçalves et al., 2004).

4.3 Sistemas activos

Ao contrário dos sistemas passivos, os sistemas activos usam meios mecânicos para o aproveitamento energético. Entre os sistemas activos de baixo consumo energético mais utilizados encontram-se os colectores solares e as bombas de calor geotérmicas.

4.3.1 Colectores solares

O funcionamento dos colectores solares é processado através de um fluido (água ou ar) que é aquecido pela incidência do sol em colectores (colocados na maior parte dos casos na cobertura dos edifícios) e depois transmitido através de bombas ou ventoinhas para um reservatório de acumulação de calor colocado no interior do edifício, para posterior utilização no aquecimento do edifício, ou em águas quentes sanitárias (Figura 4.9) (Energia7@, 2013). A principal desvantagem do uso deste tipo de solução é a necessidade de criar depósitos de grande dimensão, se for pretendida a autonomia total do sistema. As vantagens são económicas e ecológicas com a diminuição do uso das fontes de energia fósseis.



Figura 4.9- a) Colector solar; b) Sistema de funcionamento (NotaPossitiva@, 2013).

4.3.2 Bombas de calor geotérmicas

As bombas de calor geotérmicas, também designadas por “Ground Source Heat Pumps”, aproveitam o facto da temperatura do subsolo ser sensivelmente constante todo o ano e superior à temperatura do ar no Inverno e inferior no Verão. Assim durante o Verão, a bomba de calor retira calor do interior do edifício e devolve-o ao subsolo através de um sistema de tubos subterrâneo, funcionando como um dissipador de calor. No Inverno o sistema é invertido e o calor armazenado no solo é transferido para o interior do edifício através do mesmo sistema de tubos, funcionando o sistema como uma fonte de calor, permitindo o aquecimento de edifícios, piscinas e águas quentes sanitárias (Figura 4.10) (Taylor, 2011).

Entre as vantagens deste sistema encontram-se a redução de custos com aquecimento entre 25% e 75%, a redução de emissões de dióxido de carbono, produz um menor ruído e tem menor impacto visual, quando comparado, com sistemas semelhantes (energiarenovavel@, 2013).

As maiores desvantagens são o custo de instalação e o preço dos furos geotérmicos, mas apesar do maior investimento inicial em relação aos sistemas tradicionais de aquecimento, ao fim de aproximadamente três anos este sistema retorna o investimento feito (energiarenovavel@, 2013).

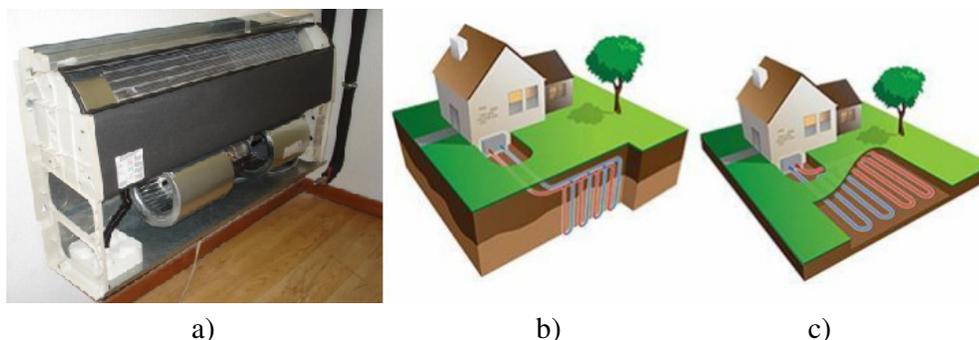


Figura 4.10- a) Bomba de calor (Coelho, 2007), Sistema de tubos: b) Vertical; c) Horizontal (Tavares, 2011).

4.3.3 Sistema mecânico de ventilação com recuperação de calor

A ventilação mecânica com recuperação de calor consiste num sistema de aspiração de ar novo para os locais necessários (de maior ocupação), como os quartos e salas, e de extracção do ar viciado pelas zonas onde a qualidade do ar interior é mais baixa, como a cozinha e casas de banho. Sendo ciclicamente a energia do ar extraído transportada para o ar novo.

Estas funções são desempenhadas por ventiladores de alto rendimento e por recuperadores de energia (permutadores que transferem energia do ar extraído para o ar absorvido) com uma eficiência (percentagem de energia reutilizada) de aproximadamente 80% (Cardoso et al., 2011).

Assim se o edifício for muito bem isolado, com pouca permeabilidade ao ar e tiver um sistema de ventilação com recuperação de calor, será necessária uma quantidade de calor para o aquecimento do espaço interior inferior aquela que seria necessária se não fosse utilizado o sistema de ventilação com recuperação de calor.

Esta quantidade de calor pode ser obtida levando ar novo para o edifício através do sistema de ventilação mecânico e ao aquecer este ar (através da troca de calor entre o ar extraído e o ar absorvido) a casa também é aquecida (Cardoso et al., 2011).

Este sistema pode ser utilizado em qualquer estação do ano, desde que se assegure que o edifício é suficientemente impermeável ao ar (de modo a não desperdiçar energia), permite ter ar novo em quantidades adequadas e com qualidade para garantir os requisitos de habitabilidade. Este sistema requer um elevado investimento inicial, mas como assegura consumos energéticos de aquecimento mais baixos, tem retorno monetário quando usado nos países mais frios (Brandão, 2008).

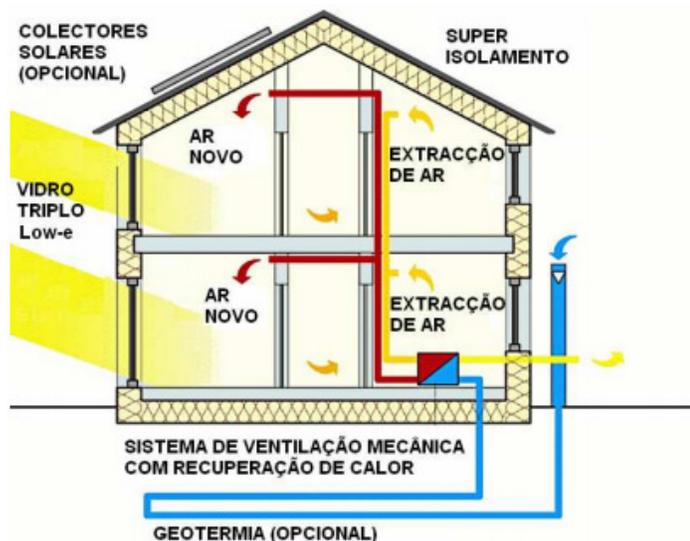


Figura 4.11- Sistema de ventilação com recuperação de calor (Passivhaus Institut@, 2013).

4.4 Arquitectura passiva

A arquitectura passiva consiste em pensar e projectar o edifício para o uso de sistemas passivos de aquecimento e arrefecimento, tendo em conta a envolvente climática e as características locais onde se insere o edifício. Entre os aspectos da arquitectura passiva encontram-se a orientação e forma do edifício, e a área e orientação dos envidraçados.

4.5 Projecto passivo

O projecto passivo é a disposição da forma do edifício, dimensões das aberturas e desempenho térmico dos materiais utilizados, de forma a limitar o uso dos recursos fósseis.

Idealmente um projecto passivo não considera sistemas activos, contudo pode não ser viável a redução do consumo energético de uma casa exclusivamente através de sistemas passivos, então poderão ser incorporados sistemas activos de baixo consumo energético como complemento (Passive-On Project, 2007a). Assim o projecto passivo recorre à arquitectura passiva e a sistemas de aquecimento e arrefecimento activos para limitar o uso de energia fóssil (carvão mineral, petróleo e gás natural).

4.6 Construção de casas passivas

4.6.1 Orientação e forma do edifício

Um dos aspectos arquitectónicos mais importantes é a orientação do edifício. Com a colocação das divisões com maiores necessidades energéticas orientadas a Sul, e compartimentos com menores necessidades orientados para Norte (Casas de banho e arrumos), é possível uma poupança média de 30% de energia (Mendonça, 2005).

No caso da área do pavimento interior ser grande, a fachada orientada a Sul deverá ser alongada de modo a permitir a inclusão de uma maior área de envidraçados expostos a Sul (Mendonça, 2005).

Outro dos aspectos a ter em conta é a exposição do edifício ao vento, sendo que no verão é benéfico um edifício alto (com maior exposição do que um edifício baixo), já no inverno será preferível um edifício mais baixo. Assim de modo a encontrar a melhor altura para o edifício será necessário conhecer a predominância dos ventos ao longo do ano (Lanham, et al., 2004).

Também a área da superfície exterior deve ser tida em conta, já que as necessidades de aquecimento aumentam com a transmissão do calor gerado no interior para o exterior através do telhado, janelas, paredes, etc. Assim quanto maior for a superfície exterior (S) que envolve o volume interior do edifício (V), maiores serão as perdas de calor. Assim para um edifício ser eficiente deve ter uma relação superfície/volume (S/V), ou seja um factor de forma baixo (Isolani, 2008).

4.6.2 Área e orientação dos Envidraçados

A área de envidraçados também deverá ser uma preocupação da arquitectura passiva, já que nas casas tradicionais, aproximadamente 30% das necessidades de aquecimento se deve às perdas de calor através dos envidraçados (Isolani, 2008).

No centro e norte da Europa, a área ideal de envidraçados expostos a Sul é geralmente de 2/3 a 3/4 da superfície total da fachada.

No caso de Portugal, a área de envidraçados na fachada Sul deve ser aproximadamente 50% a 80% da área total de envidraçados (Gonçalves et al., 1998) e aproximadamente 40% da superfície da fachada Sul. Quando estas percentagens são ultrapassadas existe sobreaquecimento no Verão, e durante o Inverno o aumento do ganho de calor não é significativo (Isolani, 2008).

As áreas de envidraçados nas fachadas Este e Oeste devem ser reduzidas, porque não melhoram significativamente o conforto térmico no Inverno (são irradiadas principalmente durante o Verão) e contribuem significativamente (mais do que as janelas na fachada Sul) para o sobreaquecimento durante o Verão, já que nestas orientações a entrada da radiação ocorre quase perpendicularmente às janelas (Isolani, 2008).

A área dos envidraçados na fachada Norte deve ser reduzida, porque é nesta direcção que ocorrem as maiores perdas térmicas através dos vidros no Inverno (Isolani, 2008).

4.6.3 Inércia térmica

A inércia térmica traduz a capacidade dos materiais armazenarem calor, e como tal diminuir as oscilações de temperaturas interiores. Para reduzir as perdas térmicas pode recorrer-se ao aumento da inércia térmica do edifício, aumentando a espessura das paredes, aumentando a espessura do isolamento pelo exterior ou enterrando os edifícios (Mendonça, 2005).

4.6.4 Isolamento térmico

O isolamento térmico influencia a quantidade de calor necessária para manter a temperatura interior de conforto, já que diminui a transferência de calor por condução entre o exterior e interior do edifício. Assim um edifício com isolamento térmico insuficiente necessita de mais aquecimento e como tal acarreta maiores custos. No Inverno a falta de isolamento faz com que o edifício arrefeça rapidamente, podendo ocorrer condensações, no verão o edifício atinge uma temperatura interior maior e mais rapidamente (Isolani, 2008).

De modo a evitar a transmissão de calor, o isolamento deve cobrir todas as partes estruturais, (pilares, vigas, paredes estruturais, etc.), as varandas e terraços não devem estar em contacto directo com os elementos posicionados dentro da área isolada termicamente, a ligação entre os diferentes elementos do edifício deve ser feita de modo a evitar pontes térmicas (áreas onde a dissipação do calor é maior do que no restante edifício) o que pode ocorrer devido a descontinuidades na colocação do isolamento térmico na junção de dois materiais diferentes como nos pilares e nas vigas.

Com a eliminação das pontes térmicas, são eliminadas as zonas frias que se situam junto a estas, o que aumenta a temperatura interior, impede o aparecimento de zonas de condensação e a formação de bolor nas paredes interiores (Isolani, 2008).

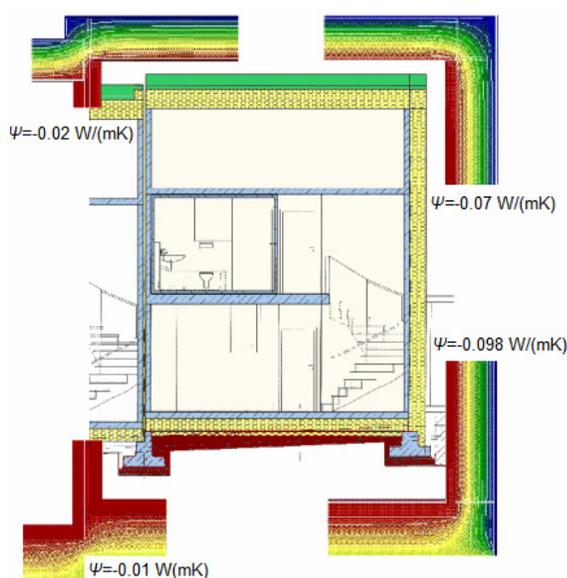


Figura 4.12- Isolamento térmico de uma casa passiva (Passivhaus Institut@, 2013).

Isolamento térmico das paredes exteriores

Existem diversos tipos e técnicas de isolamento das paredes exteriores. A sua escolha deve ser feita consoante o grau de isolamento pretendido, as restrições existentes à aplicação do isolamento e o seu custo. Os materiais isolantes são geralmente porosos e de baixa densidade, sendo os mais utilizados o poliestireno expandido (EPS), o poliestireno extrudido (XPS), espuma de poliuretano (PUF), aglomerado de cortiça (ICB), e a lã mineral (MW). Dependendo dos condicionantes os materiais podem ser usados sob a forma de placas compactas, espuma, tapetes ou placas de feltro (Isolani, 2008).

O tipo de isolamento de paredes exteriores mais eficaz consiste na colocação de placas isolantes ou a aplicação de espuma isolante de forma contínua e regular, pela parte exterior do edifício, sendo depois o material isolante revestido de modo a obter-se uma aparência tradicional. Este tipo de isolamento tem as vantagens de eliminar as pontes térmicas quase na totalidade, já que é praticamente ininterrupto e permite aumentar facilmente a espessura do isolamento e como tal baixar o nível de transmissão térmica. A sua maior desvantagem é o custo (Isolani, 2008).

Outro método possível para a colocação de isolamento das paredes exteriores, é a sua colocação na caixa-de-ar. Tal pode ser feito através de placas de isolamento colocadas no paramento interior da parede exterior, de forma a proteger o material da chuva, ou através da injeção de espuma ou grânulos, geralmente de poliestireno expandido, de forma a preencher a caixa-de-ar (Isolani, 2008). Este caso tem as desvantagens de existirem sempre pontes térmicas quando a caixa-de-ar é interrompida (o que acontece na ligação da caixa-de-ar com os pilares e vigas) e no caso da colocação de espuma ou grânulos é difícil garantir a aplicação uniforme do isolamento (Figura 4.13).

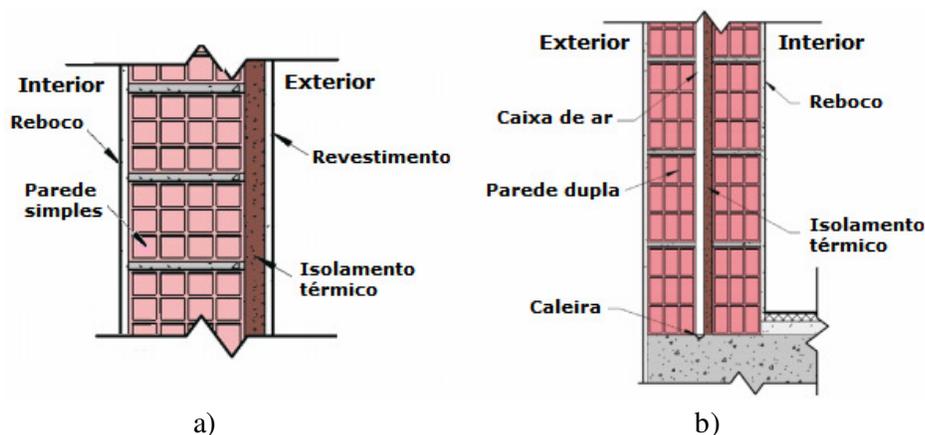


Figura 4.13- Isolamento: a) Pelo exterior; b) Na caixa-de-ar (Projectista@, 2013b).

Já o isolamento térmico de paredes exteriores pelo interior do edifício apenas evita as pontes térmicas em pilares, na zona de ligação viga/laje este tipo de isolamento não é contínuo e como tal existem pontes térmicas nessas zonas. Este tipo de isolamento tem ainda o inconveniente de não permitir o aproveitamento da inércia térmica das paredes (Figura 4.14). Uma das suas vantagens é a possibilidade de se aplicar este sistema de forma eficaz nas paredes orientadas a Norte para impedir que o calor durante o inverno seja transmitido do interior para o exterior do edifício. Também o seu reduzido custo e a sua fácil aplicação, sem necessidade de mão-de-obra especializada, devem ser tidos em conta na altura de escolher o sistema de isolamento (Isolani, 2008).

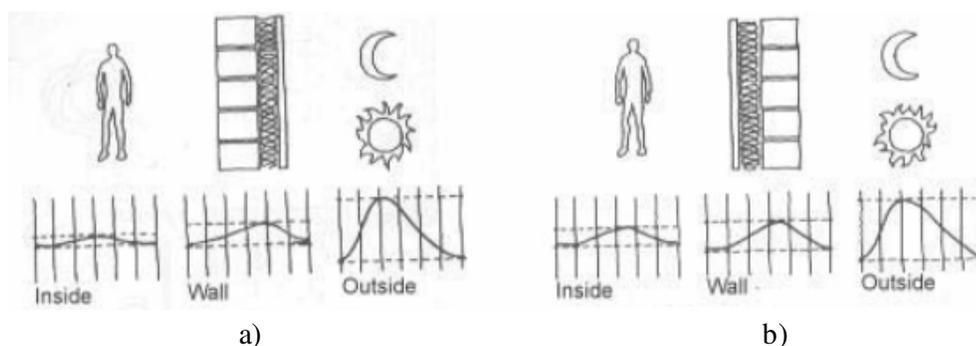


Figura 4.14- Variação da temperatura ao longo do dia num elemento com isolamento pelo a) Exterior; b) Interior (Lanham et al., 2004).

Isolamento térmico da Cobertura

A cobertura é normalmente o elemento da envolvente exterior por onde ocorrem as maiores perdas de calor num edifício (Isolani, 2008), e como tal o seu isolamento térmico deve ser uma prioridade, já que trata-se de um procedimento relativamente simples que permite uma grande diminuição dos gastos energéticos.

No caso das coberturas horizontais, deve ser usado o sistema invertido onde é colocado sobre a camada de forma (inclinação, 1% a 2%, sobre a laje para escoar água), um material impermeabilizante (telas asfálticas, argamassas de impermeabilização, etc.), seguindo-se uma

camada de isolamento térmico sob a forma de placas (poliestireno extrudido, aglomerado de cortiça, etc.), e por ultimo é colocada uma camada de protecção pesada (Betonilha, gravilha, etc.). Este sistema em relação à cobertura tradicional, onde o isolamento térmico é colocado sobre a camada de forma, tem a vantagem de proteger a camada de impermeabilização das variações térmicas e de outras agressões (Isolani, 2008). Na cobertura tradicional existe ainda a necessidade de colocar uma barreira pára-vapor (película betuminosa, película resinosa, etc.) sob a camada isolante, já na cobertura invertida a camada de impermeabilização serve de barreira ao vapor, uma vez que se encontra sob o isolamento térmico e portando esta camada mantém quente as camadas inferiores e em temperaturas muito acima das quais ocorre a condensação, a temperatura de ponto de orvalho (Pinto, 2002).

Tanto nas coberturas invertidas como nas tradicionais é comum o uso de uma ou mais camadas de protecção geotextil de forma a separar camadas e impedir a acumulação de sujidade nas camadas inferiores. Nas coberturas onde é usada terra vegetal (coberturas ajardinadas) existe ainda uma camada drenante (seixo, brita, etc.) para escoar a água proveniente dessa terra (Figura 4.15).

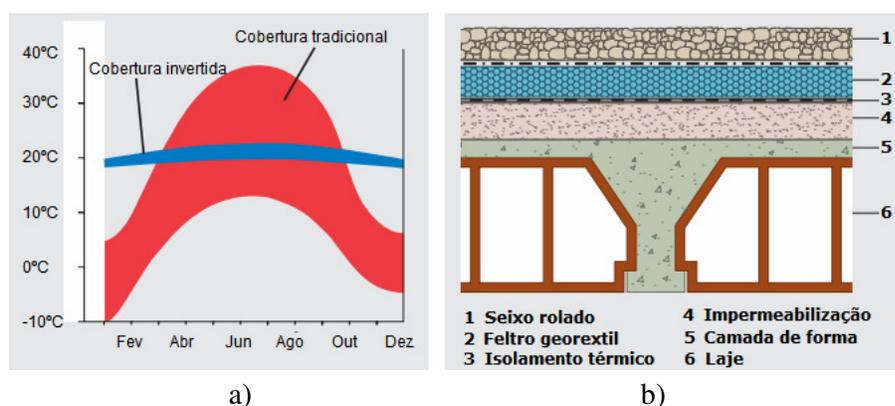


Figura 4.15- a) Variação da temperatura anual na camada de impermeabilização; b) Exemplo de cobertura invertida (Projectista@, 2013a).

No caso de coberturas inclinadas com um desvão habitável, o isolamento térmico deve ser colocado sob o telhado e sobre a impermeabilização da laje (isolamento das vertentes), no caso de o telhado não possuir laje, o isolamento deve ser colocado sob a estrutura de fixação do telhado (Isolani, 2008).

Se a cobertura for inclinada, mas não existir um desvão habitável, o isolamento pode ser colocado sobre a laje de pavimento (isolamento da esteira horizontal) (Isolani, 2008).

Isolamento térmico dos pavimentos

Os pavimentos devem ser isolados especialmente quando estão em contacto com o exterior (Pavimento térreo, etc.) ou com espaços interiores não aquecidos (laje entre sala e arrumo, etc.), já que é nestas condições, quando existe diferença de temperatura entre os diferentes espaços, que ocorre a transferência térmica.

Isolamento térmico das janelas

O isolamento térmico dos envidraçados depende da qualidade do vidro e da caixilharia. Em Portugal normalmente é utilizado o vidro duplo, que dependendo do afastamento entre vidros (normalmente 8, 10, 12, 14 ou 16mm) e preenchimento desse espaço (normalmente ar atmosférico, ou raramente gases com maior densidade e maus condutores de calor como o Krypton, e o Xenon), permite reduzir aproximadamente 50% da perda de calor que ocorre em vidros simples (Isolani, 2008).

As caixilharias devem ser em madeira, policloreto de polivinila (PVC) ou em alumínio com corte térmico. A caixilharia em alumínio necessita do corte térmico (formação da caixilharia por perfis independentes unidos por um material mais isolante) devido aos metais serem materiais condutores de calor, o que potencia as trocas térmicas entre o exterior e interior do edifício (Figura 4.16) (Isolani, 2008).

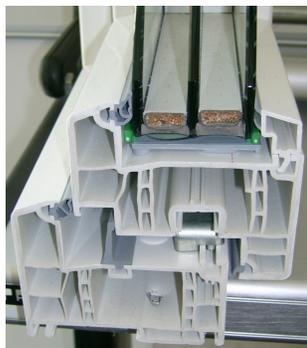


Figura 4.16- Corte térmico.

4.6.5 Impermeabilidade ao ar

Uma casa muito isolada termicamente não tem necessariamente pouca permeabilidade (impermeabilidade) ao ar. De modo a garantir a impermeabilidade o isolamento térmico deve ser colocado de forma contínua por toda a envolvente exterior do edifício e as janelas e portas devem ser montadas de forma a evitar imperfeições (passagem de ar) entre o caixilho e a parede exterior.



Figura 4.17- Impermeabilidade ao ar (Passivhaus Institut@, 2013).

5 CASO DE ESTUDO: MINI-HAVEN

5.1 Introdução

No caso de estudo aplicou-se o conceito de casa “Passivhaus” a uma das versões da moradia Mini-Haven (versão B V1), da empresa Cool Haven (Cool-Haven@, 2013), e através de uma análise paramétrica estudam-se diferentes soluções construtivas (que cumpram a norma Passivhaus) para esta moradia.

5.2 Moradia Mini-Haven

5.2.1 Geometria

O edifício em análise (Figura 5.1, Figura 5.2 e ANEXO A) corresponde a uma moradia unifamiliar isolada (para dois ocupantes), com estrutura em aço leve, área bruta de 26,58 m² e situada no distrito de Coimbra. A moradia tem um andar composto por três divisões: quarto com envidraçado orientado para Norte; casa de banho com envidraçado orientado para Sul; e por sala de refeições, cozinha e sala de estar com envidraçados orientados para Norte e Sul.

O quarto e a sala de refeições, cozinha e sala de estar têm acesso independente ao exterior.

A fachada do edifício é de cor clara, a cobertura é plana e o pé direito é de 2,7m.

O zoneamento térmico da moradia foi feito dividindo a moradia em três zonas com diferentes tipos de ocupação, consumo de águas quentes sanitárias, exposição solar, etc., e portanto com diferentes comportamentos energéticos. Uma zona é composta por sala, cozinha e sala de refeições, outra das zonas é composta por quarto e uma última zona composta por casa de banho.

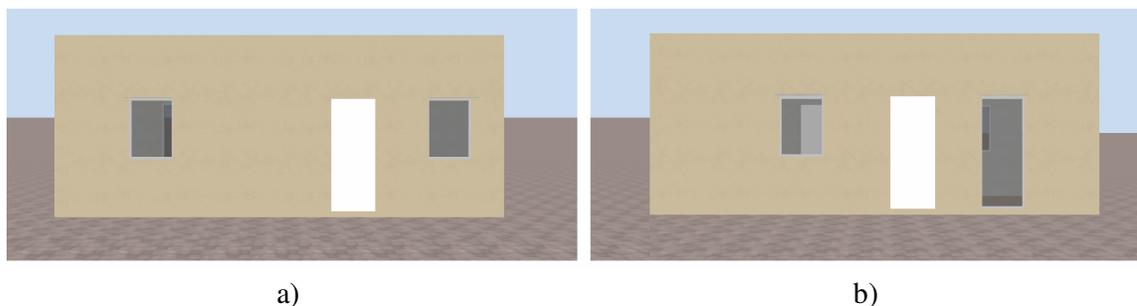


Figura 5.1- Modelo da moradia Mini-Haven: a) Fachada Norte; b) Fachada Sul.

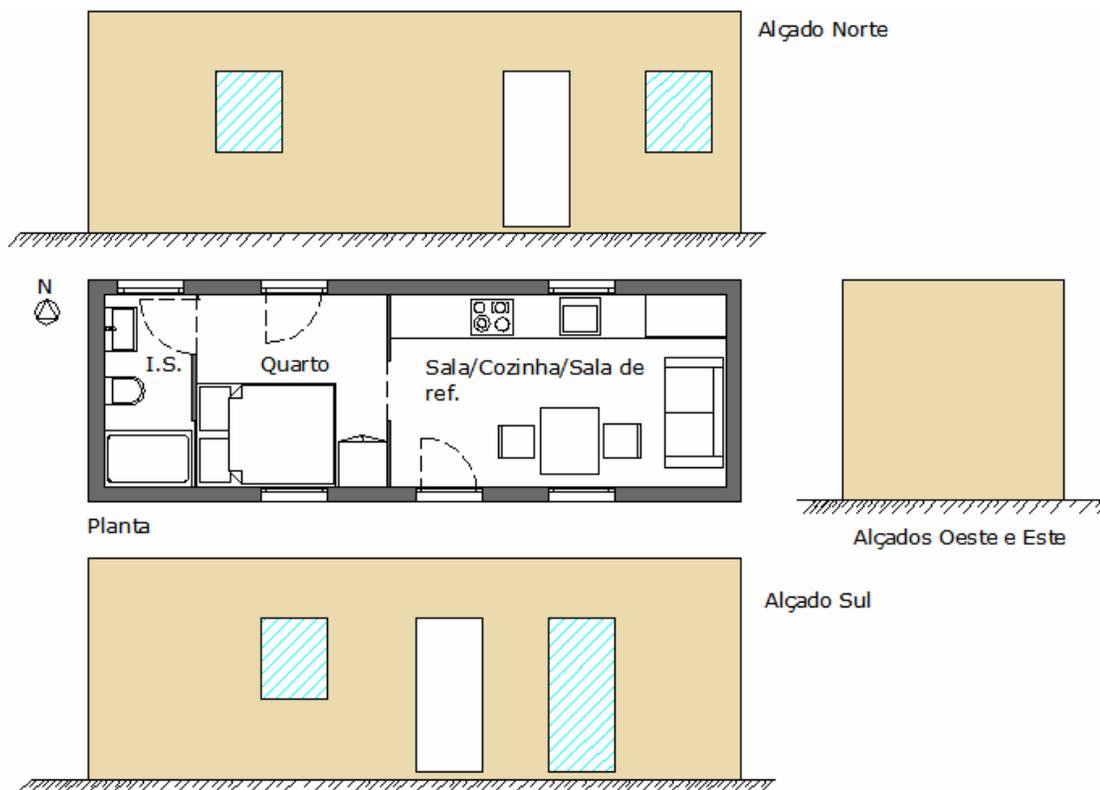


Figura 5.2- Moradia Mini-Haven.

Quadro 5.1- Descrição da moradia Mini-Haven.

Divisão	Área útil [m ²]	Área das janelas [m ²]	Orientação das janelas
Sala	11,9	1,89	Sul
		0,99	Norte
Quarto	6,8	0,99	Sul
Casa de banho	3,2	0,99	Norte

5.2.2 Dados climáticos

A modelação, das condições climáticas exteriores, foi feita usando os dados climáticos para Coimbra obtidos através do IWEC (*International Weather for Energy Calculations*) (U.S. Department of Energy, 2013).

Em Coimbra a latitude é 40°12'25''Norte, a longitude é 8°24'39''Oeste e a altitude é de 140m.

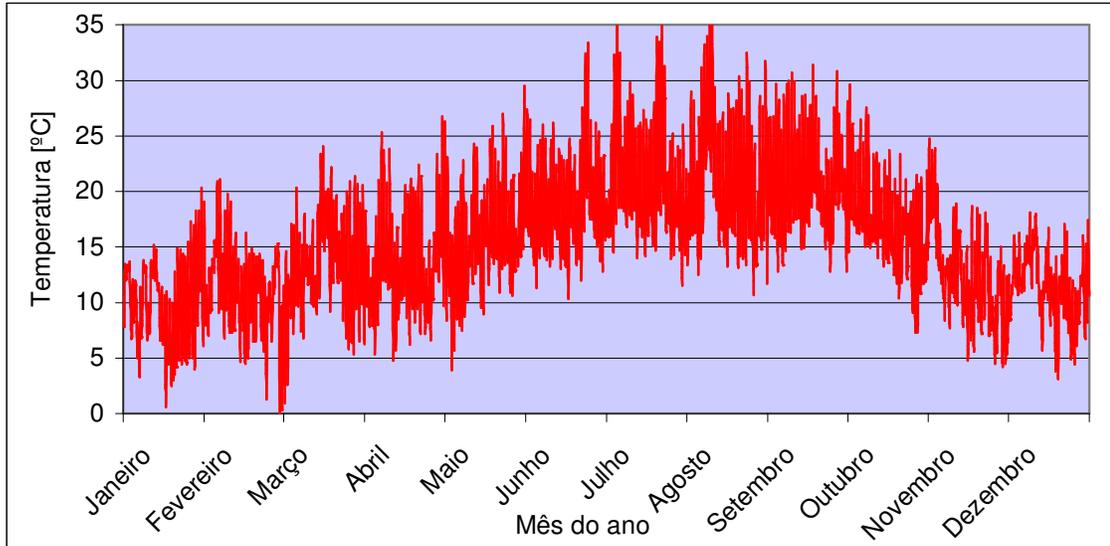


Figura 5.3- Variação horária da temperatura em Coimbra (IWE).

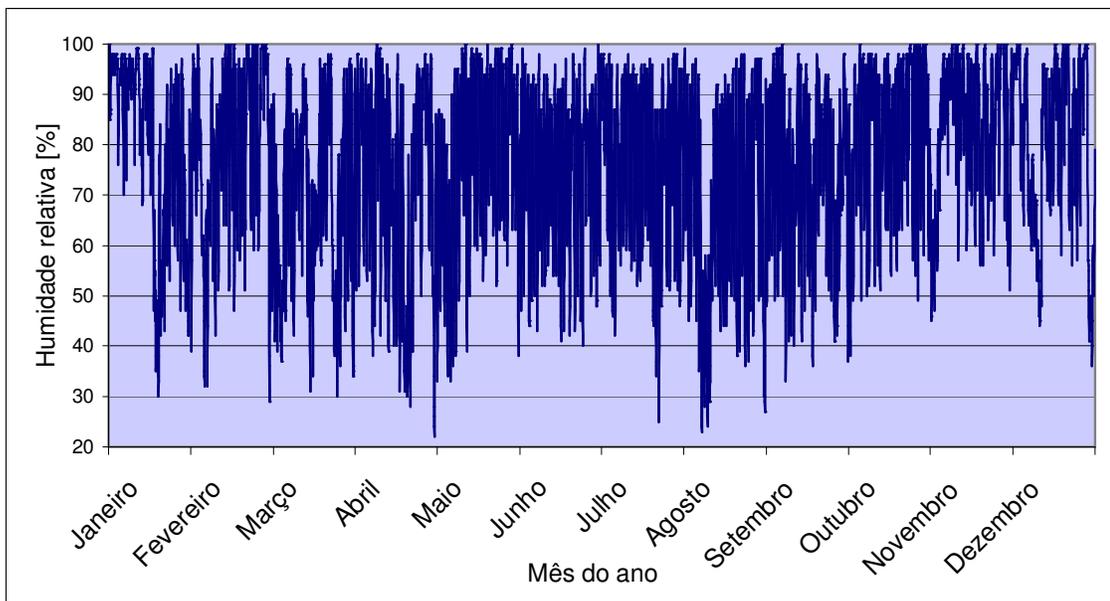


Figura 5.4- Variação horária da humidade relativa em Coimbra (IWE).

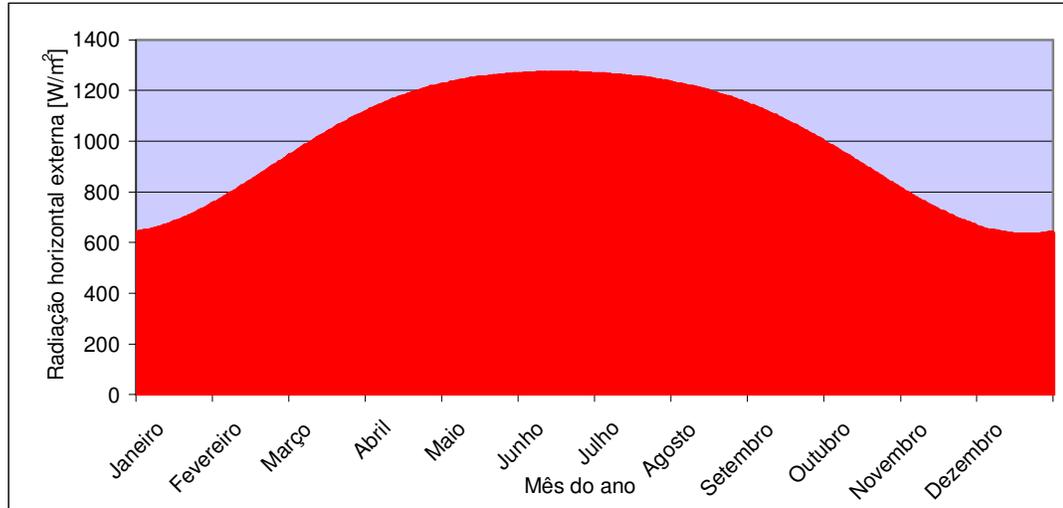


Figura 5.5- Variação horária da radiação, em W/m^2 , medida em plano horizontal externo em Coimbra (IWECC).

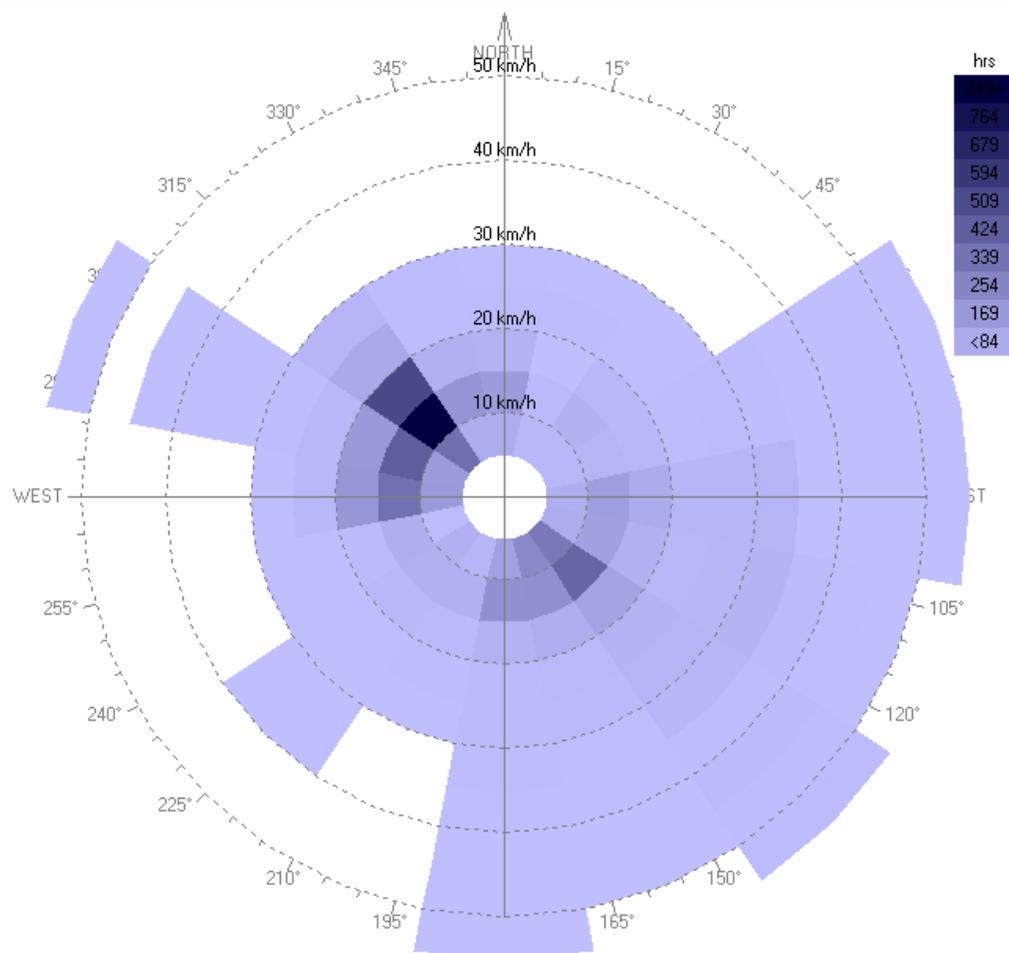


Figura 5.6- Frequência em hertz, velocidade em km/h e direcção do vento em Coimbra (IWECC).

5.2.3 Tipo de ocupação e ganhos internos

Foi considerado um horário de ocupação típico de moradias unifamiliares em Portugal, onde a casa está habitada ao longo do ano, durante sete dias da semana (horário no ANEXO C).

Os dois ocupantes podem estar em simultâneo na sala e no quarto, enquanto a casa de banho serve apenas um ocupante de cada vez (Quadro 5.2).

De acordo com o RCCTE considerou-se que os ganhos internos totais, devido a iluminação, electrodomésticos, metabolismo, banhos, cozinhados, etc., são de 4 W/m^2 .

Quadro 5.2- Tipo de ocupação.

Divisão	Numero máximo de ocupantes	Dias por semana
Sala	2	7
Quarto	2	7
Casa de banho	1	7

5.3 Software

Para este trabalho utilizou-se o software de modelação do comportamento energético de edifícios EnergyPlus 7.0, versão 3.0.0.105, desenvolvido pelo DOE (USA Department of Energy) e baseado nos softwares BLAST e DOE-2.

No EnergyPlus é possível atribuir uma série de factores que influenciam o comportamento energético do edifício, como as diferentes soluções construtivas, vários mecanismos de redução de energia, diversas geometrias de edifícios, tipo de iluminação, tipo de ocupação, diferentes equipamentos eléctricos, horário de funcionamento, etc.

O EnergyPlus permite ainda a ligação a outros programas como o COMIS, para modelação do fluxo do ar e ao AutoCAD e DesignBuilder, para a simulação da arquitectura.

Da modelação resultam diversas previsões (anuais, semanais, horárias, etc.) do comportamento energético global do edifício e de zonas específicas (quartos, sala, etc.). Destas previsões destacam-se as perdas e ganhos térmicos, consumos de energia, características climáticas, e o nível de conforto dos ocupantes através da análise da temperatura interior, humidade relativa do ar interior, entre outros.

De modo a complementar a modelação com uma interface gráfica, utilizou-se o software DesignBuilder, onde é possível representar em três dimensões o edifício analisado pelo EnergyPlus. Assim minimizam-se os erros na inserção de dados e tem-se uma visão menos abstracta da solução obtida.

Este tipo de modelação permite que antes da construção do edifício, sejam estudadas diversas soluções, de modo a minimizar os consumos de energia e melhorar o conforto térmico dos ocupantes. Para tal após a introdução do edifício inicial em análise no software, é possível substituir diversos elementos construtivos, como o tipos e áreas de envidraçados, revestimentos, sistema de climatização, até o processo iterativo conduzir a uma solução satisfatória.

Para além do EnergyPlus, existem diversos softwares de simulação do comportamento energético de edifícios com características semelhantes e que conduzem a resultados de poupança e conforto energético também semelhantes, como o TRNSYS, ESP-r, BLAST, HAP 4.31, TRACE 700, DOE-2, CLIM 2000, Visual DOE 4.1, S3PAS, TASE, SUNREL, entre outros.

Na figura seguinte (Figura 5.7) apresenta-se a comparação entre três destes softwares, recorrendo ao consumo anual de electricidade de uma casa existente (Base-case), e a medidas de poupança energética iguais, modeladas nos diferentes softwares. É apresentado a poupança de electricidade anual devido à impermeabilidade ao ar (air_seal), isolamento do sótão (attic_ins.), isolamento das paredes exteriores (wall_ins.), uso de termostato (setback), isolamento das janelas (windows), incidência de radiação solar (sol_abs.). Foram ainda somadas as poupanças de electricidade proveniente destas medidas (combined).

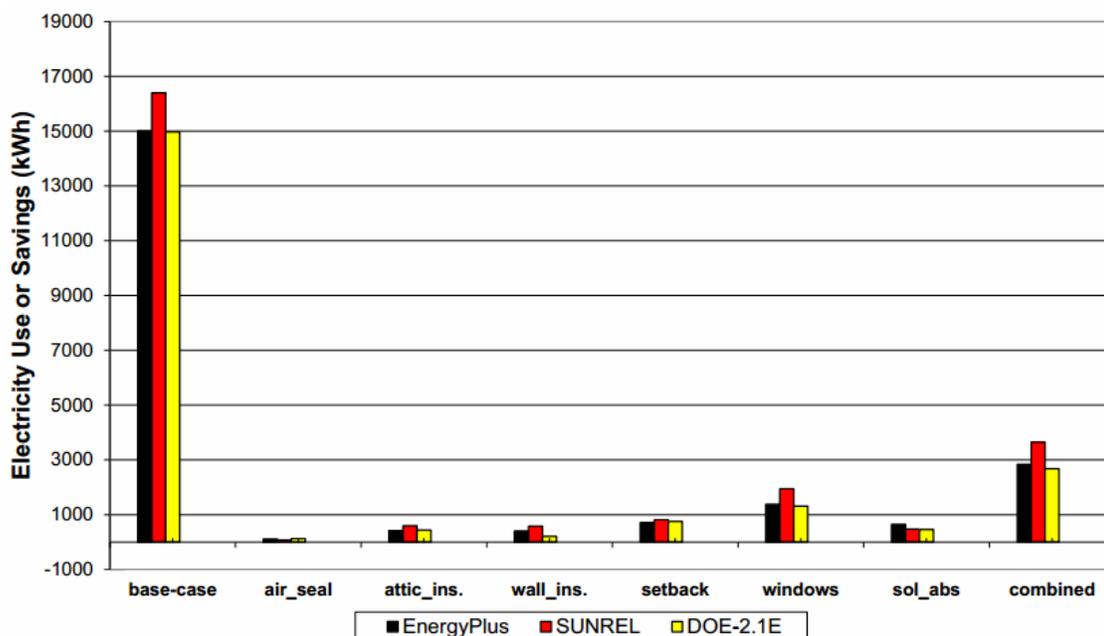


Figura 5.7- Comparação entre os resultados obtidos por diferentes softwares (Judkoff, Polly, Bianchi, Neymark and Kennedy, 2011).

A modelação das pontes térmicas que ocorrem nas paredes exteriores e cobertura, devido à estrutura em aço leve (enformado a frio), foi feita através do software THERM 6.3.46. Este programa foi desenvolvido pelo laboratório de Lawrence Berkeley e permite modelar a duas dimensões, pelo método dos elementos finitos, a transferência de calor que ocorre através de vários componentes dos edifícios (janelas, pilares, portas, etc.) (THERM, 2013).

Tal como em alguns dos softwares anteriores, e de modo a facilitar a introdução da geometria do elemento a analisar, o THERM permite a ligação ao AutoCAD.

5.4 Análise base

5.4.1 Climatização e águas quentes sanitárias

A climatização da moradia é feita por um ar condicionado tipo split eléctrico composto por duas unidades interiores (situadas no quarto e na sala) e outra exterior com ligação feita por um tubo de cobre onde circula um líquido refrigerante, tendo o sistema de aquecimento um COP (coeficiente de desempenho) de 4 (a energia térmica fornecida é 4 vezes superior à energia consumida pelo sistema) e o sistema de arrefecimento um COP de 3 (RCCTE, 2006). O aquecimento de águas quentes sanitárias é efectuado através de uma caldeira a gás natural com um COP de 0,85 (RCCTE, 2006).

O sistema mecânico de arrefecimento é activado quando a temperatura interior atinge os 26°C (temperatura máxima permitida pela Norma Passivhaus) e o sistema mecânico de aquecimento é activado quando a temperatura interior desce até aos 20°C.

A ventilação é feita através da abertura de janelas (abertas se a temperatura interior for superior a 23°C e a temperatura exterior for inferior à temperatura interior) e pode atingir até 4,0 renovações por hora, e pela infiltração de ar, onde se estabeleceu que a construção permitia 0,6 renovações por hora devido a infiltrações.

O consumo de água quente sanitária considerado, de acordo com o RCCTE, foi de 40 litros por ocupante.

Quadro 5.3- Aquecimento e arrefecimento mecânico.

Sistema de ar condicionado tipo Split	Zonas	Activação
Arrefecimento	Sala	T > 26°C
	Quarto	
	Casa de banho	-
Aquecimento	Sala	T < 20°C
	Quarto	
	Casa de banho	-

5.4.2 Isolamento térmico

De modo a cumprir a área útil da moradia Mini-Haven, as paredes exteriores têm uma espessura de 20cm e as paredes interiores têm 5cm de espessura.

De modo a manter um pé direito de 2,7m, a cobertura tem 30cm de espessura.

Os coeficientes de condutividade dos materiais utilizados foram obtidos na base de dados do EnergyPlus.

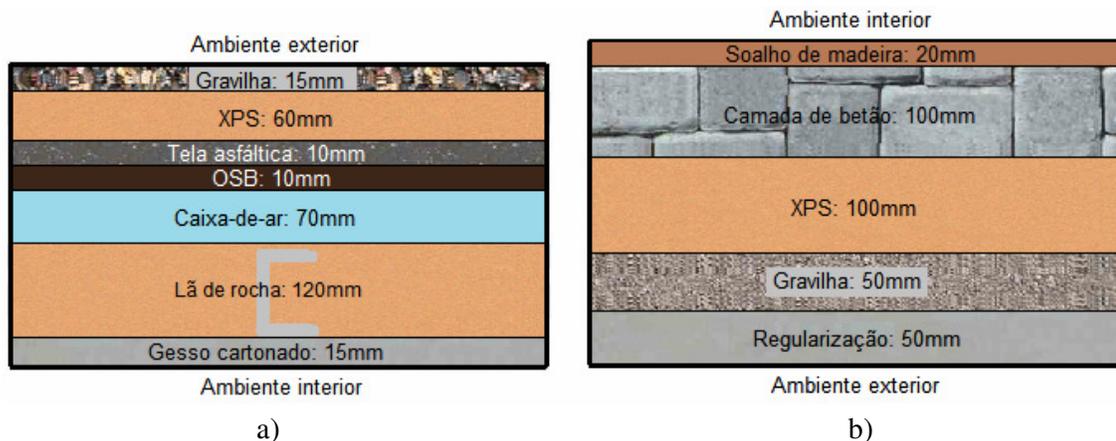


Figura 5.8- Isolamento térmico adoptado na análise base para: a) Cobertura; b) Pavimento.

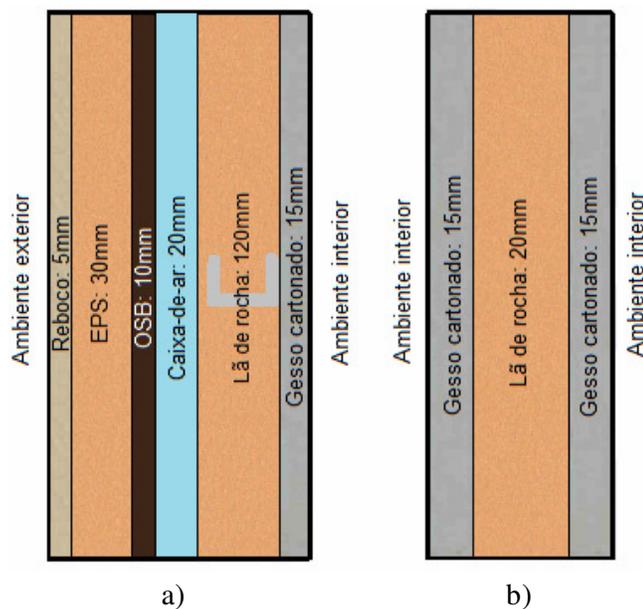


Figura 5.9- Isolamento térmico adoptado na análise base para: a) Paredes exteriores; b) Paredes interiores.

Quadro 5.4- Isolamento térmico adoptado na análise base.

Elemento	Camada	Espessura (h) [mm]	Condutividade (λ) [W/mK]	U [W/m ² K]
Cobertura plana	Gravilha	15,00	1,440	0,225
	XPS	60,00	0,034	
	Tela asfáltica	10,00	1,150	
	OSB	10,00	0,130	
	Caixa-de-ar	70,00	-	
	Lã de rocha	120,00	0,040	
	Gesso cartonado	15,00	0,180	

Paredes exteriores	Reboco	5,00	1,150	0,282
	EPS	30,00	0,040	
	OSB	10,00	0,130	
	Caixa-de-ar	20,00	-	
	Lã de rocha	120,00	0,040	
	Gesso cartonado	15,00	0,180	
Paredes Interiores	Gesso cartonado	15,00	0,180	0,459
	Lã de rocha	20,00	0,040	
	Gesso cartonado	15,00	0,180	
Pavimento	Soalho de madeira	20,00	0,140	0,283
	Camada de betão	100,00	0,960	
	XPS	100,00	0,0340	
	Gravilha	50,00	0,520	
	Regularização	50,00	1,400	

$$U = \frac{1}{R_{SE} + \sum J R_J + R_{SI}} \quad (\text{Fórmula 5.1})$$

Onde:

R_{SE} é a resistência térmica superficial exterior (Quadro 5.5);

R_J é a resistência térmica das camadas do elemento em análise ($R_J = h/\lambda$);

R_{SI} é a resistência térmica superficial interior (Quadro 5.5).

Quadro 5.5- Resistências térmicas superficiais de acordo com o RCCTE.

Elemento	R_{SE} - Exterior [m^2oC/W]	R_{SI} - Interior [m^2oC/W]
Paredes (fluxo de calor horizontal)	0,04	0,13
Cobertura (fluxo de calor ascendente)	0,04	0,10
Pavimento (fluxo de calor descendente)	0,04	0,17

Quadro 5.6- Resistências térmicas das caixas-de-ar de acordo com o RCCTE.

Elemento	Espessura da caixa-de-ar [mm]	Resistência térmica [m^2oC/W]
Paredes exteriores (fluxo de calor horizontal)	15	0,17
	De 25 até 100	0,18
Cobertura (fluxo de calor ascendente)	De 15 a100	0,16

Como a moradia é constituída por uma estrutura metálica em aço leve, com perfis C100x40x10x1,0, com um afastamento entre eles de 0,6 metros, vão surgir pontes térmicas nos locais de colocação dos perfis. A influência destes perfis (embutidos na camada de lã de rocha) no coeficiente de transmissão térmica das paredes exteriores e cobertura, foi analisada pelo software THERM 6.3.46.

Na modelação, a condição fronteira entre o exterior e a primeira camada (reboco na parede e asfalto na cobertura) foi definida de modo a permitir apenas a transferência de calor por convecção (pelo ar) e por radiação.

A condição fronteira entre as diferentes camadas interiores foi definida de modo a permitir a transmissão de calor por condução (contacto entre as camadas), convecção e radiação (entre superfícies a temperaturas diferentes).

A condição fronteira entre a última camada (gesso cartonado) e o interior foi definida de modo a permitir a transferência de calor por convecção e por radiação.

No capítulo 5.5.2, Quadro 5.12, são indicados os valores dos coeficientes de transmissão térmica das paredes exteriores e cobertura, que foram utilizados na análise (considerando as pontes térmicas) e o valor do coeficiente de transmissão térmica se as pontes térmicas não fossem consideradas.

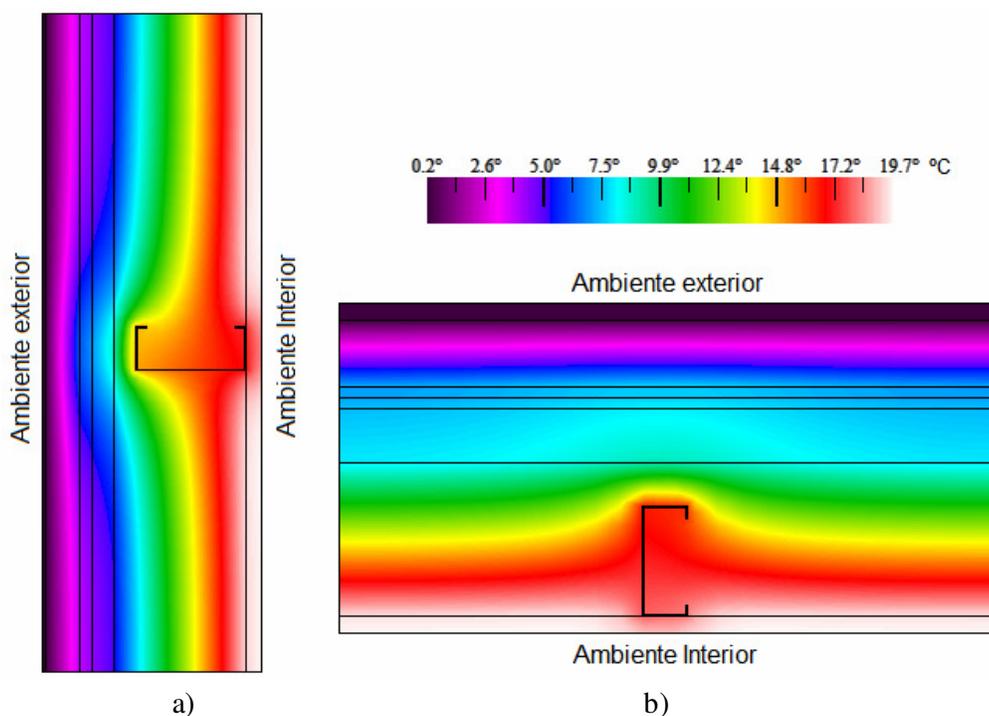


Figura 5.10- Fluxo térmico na: a) Parede exterior; b) Cobertura.

5.4.3 Portas, janelas e sombreamento

As janelas possuem estores venezianos, colocados pelo exterior, com lâminas de grande reflectividade, posicionadas de modo a impedir a radiação solar directa.

Os estores são activados quando a temperatura interior atinge os 23°C, a condutividade térmica das lâminas é de 0,9 W/mK e o seu factor solar (g'_{\perp}) é 0 (nenhuma da energia solar incidente nos estores é transmitida para o interior). As janelas têm no seu topo palas horizontais (em betão), com um comprimento de 50cm e a mesma largura das janelas.

Quadro 5.7- Janelas adoptadas na análise base.

Elemento	Camada	Espessura [mm]	($g_{\perp V}$)	U [W/m ² °C]
Vidro duplo incolor	Vidro exterior	8,00	0,715	2,76
	Caixa-de-ar	10,00		
	Vidro interior	6,00		
Caixilharia	PVC (sem corte térmico)	-	-	3,476

De acordo com o RCCTE, o factor solar do vão envidraçado no verão (g_{\perp}) é dado por:

$$g_{\perp} = 0,7 \times g'_{\perp} + 0,3 \times g_{\perp V} = 0,215 \text{ (Fórmula 5.2)}$$

Onde:

g'_{\perp} é o factor solar do vão envidraçado com a protecção activa;

$g_{\perp V}$ é o factor solar do vidro.

Quadro 5.8- Portas adoptadas.

Portas	Cor	Material	Espessura [mm]	(λ) [W/mK]	U [W/m ² °C]
Exteriores	Branco	Madeira maciça	42,00	0,19	2,56
Interiores	Branco	Madeira maciça	35,00	0,19	2,251

5.4.4 Conforto térmico

As soluções construtivas adoptadas permitem manter a temperatura interior da moradia entre os 20°C e os 26°C (limites da Norma Passivhaus) durante todo o dia (Figura 5.11).

A humidade relativa mínima encontra-se na maior parte do tempo superior aos 30% (Figura 5.12), o que permite que o ar não seja demasiado seco.

Quando se atinge a temperatura interior máxima da moradia (26°C), a humidade relativa é de aproximadamente 70%, o que permite que não ocorra condensação, caso a temperatura interior baixe subitamente para o seu valor mínimo (20°C), já que esta só ocorre para temperaturas inferiores a 20°C (Ponto de condensação do Quadro 5.9).

Quadro 5.9- Ponto de condensação.

Temperatura interior (T) [°C]	Humidade relativa (HR) [%]	Ponto de condensação [°C]
26	70	20

$$\text{Ponto de Condensação [°C]} = \sqrt[3]{\frac{HR}{100} \times [112 + (0,9 \times T)] + (0,1 \times T)} - 112 \text{ (Fórmula 5.3)}$$

Os valores mínimos da humidade relativa ocorrem durante o Inverno devido à menor quantidade de vapor de água presente no ar nesse período (habitualmente as temperaturas mais baixas contêm menores quantidades de vapor de água). Os picos máximos de humidade ocorrem devido a banhos e preparação do almoço e jantar.

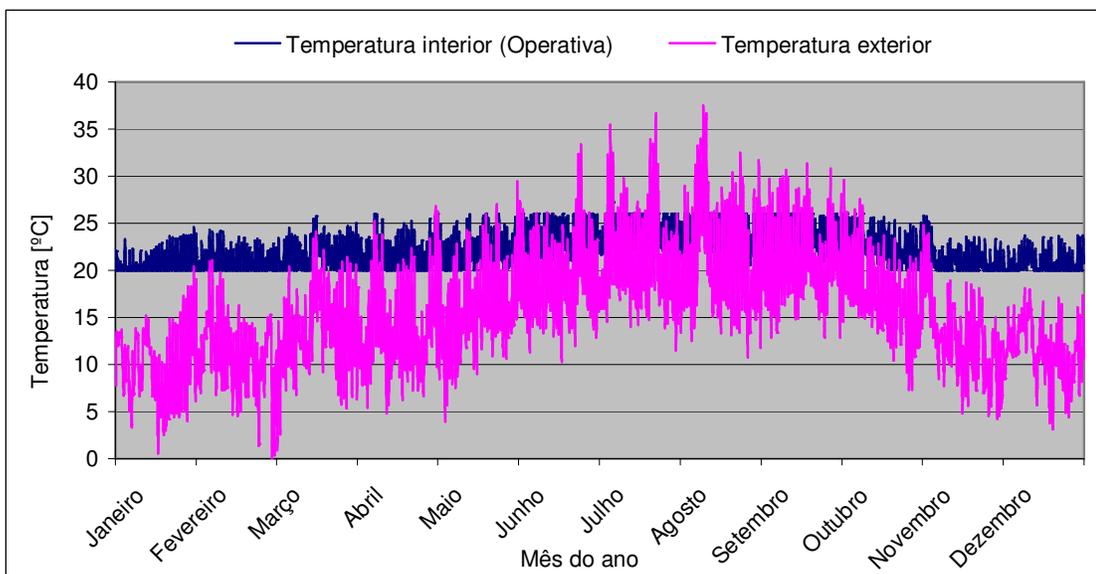


Figura 5.11- Variação horária da temperatura interior [°C].

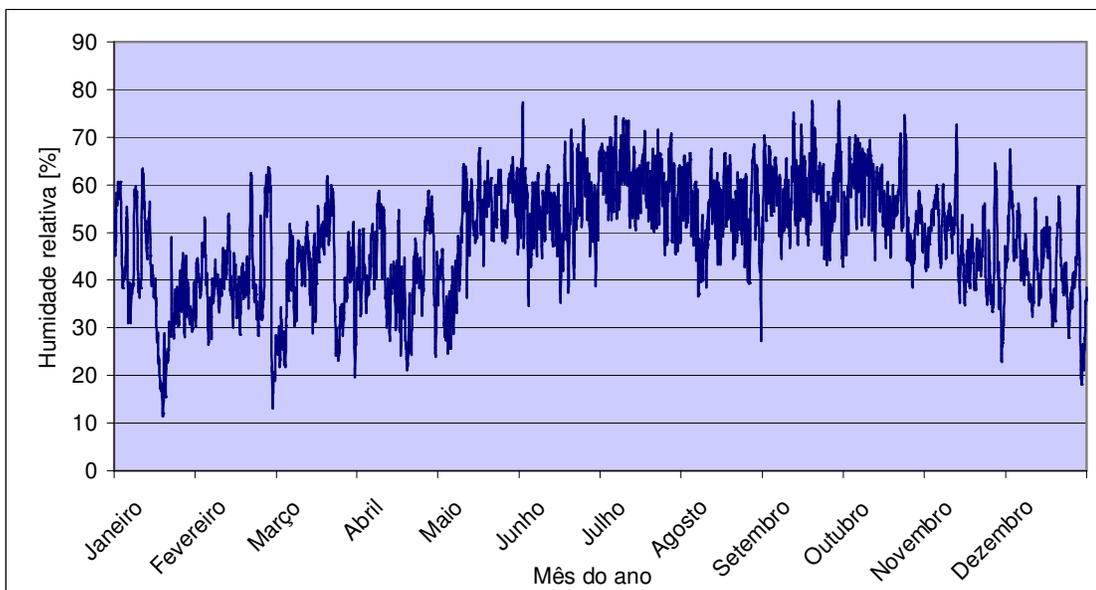


Figura 5.12- Variação horária da humidade relativa interior [%].

5.4.5 Ganhos internos de calor

O arrefecimento mecânico é utilizado na Primavera (21 Março a 21 Junho), Verão (21 Junho a 21 Setembro) e Outono (21 Setembro a 21 Dezembro). O arrefecimento mecânico é necessário durante a Primavera e Inverno (21 Dezembro a 21 de Março). Na Primavera o arrefecimento mecânico é activado quando existe algum dia com temperaturas semelhantes às verificadas no Verão (Figura 5.13).

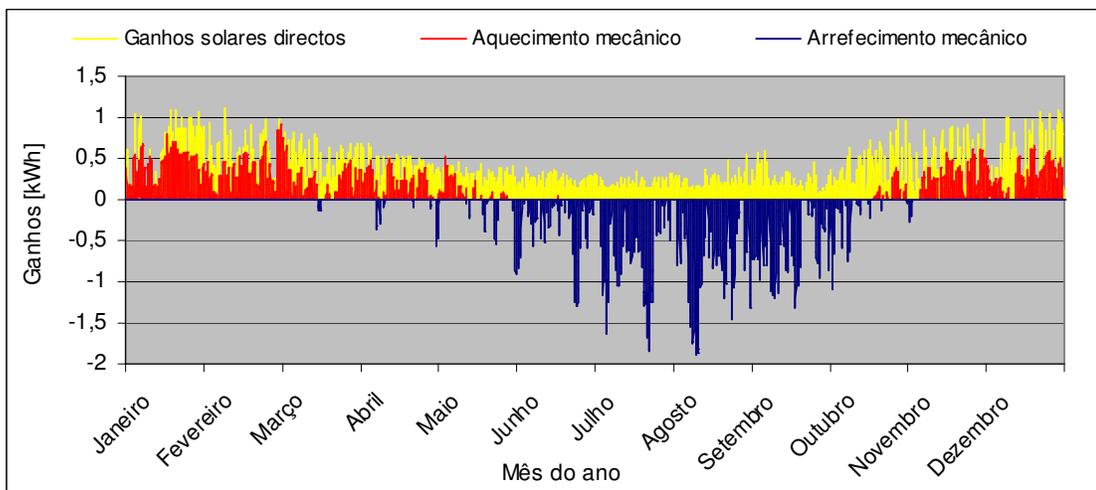


Figura 5.13- Variação horária dos ganhos internos de calor devido a radiação solar directa, aquecimento mecânico e arrefecimento mecânico [kWh].

Os ganhos térmicos devidos ao aquecimento mecânico são inferiores aos ganhos devido à radiação solar directa, porque o sistema mecânico de aquecimento só é activado quando a radiação solar directa em conjunto com os restantes ganhos passivos não são suficientes para manter as condições interiores de conforto (Figura 5.14).

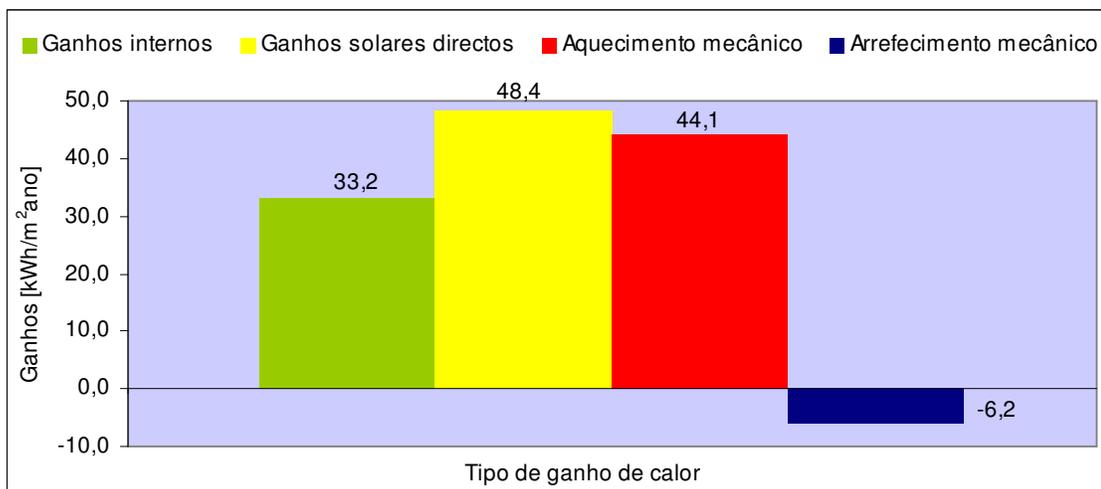


Figura 5.14- Ganhos anuais de calor [kWh/m²ano].

5.4.6 Perdas e ganhos de calor pela envolvente exterior

A perda de calor devido a infiltrações resulta de imperfeições da construção, onde se assumiu que a envolvente exterior permitia 0,6 renovações por hora, enquanto que a perda de calor devido à ventilação natural resulta da abertura de janelas.

Ao longo do ano as infiltrações provocam maioritariamente perdas de calor, excepto num período entre Julho e Setembro, onde existe a entrada de ar quente que provoca o aquecimento do ambiente interior.

Já a ventilação natural causa apenas perdas de calor (arrefecimento), que é maior nos meses mais quentes, devido à abertura das janelas durante maiores períodos (Figura 5.15).

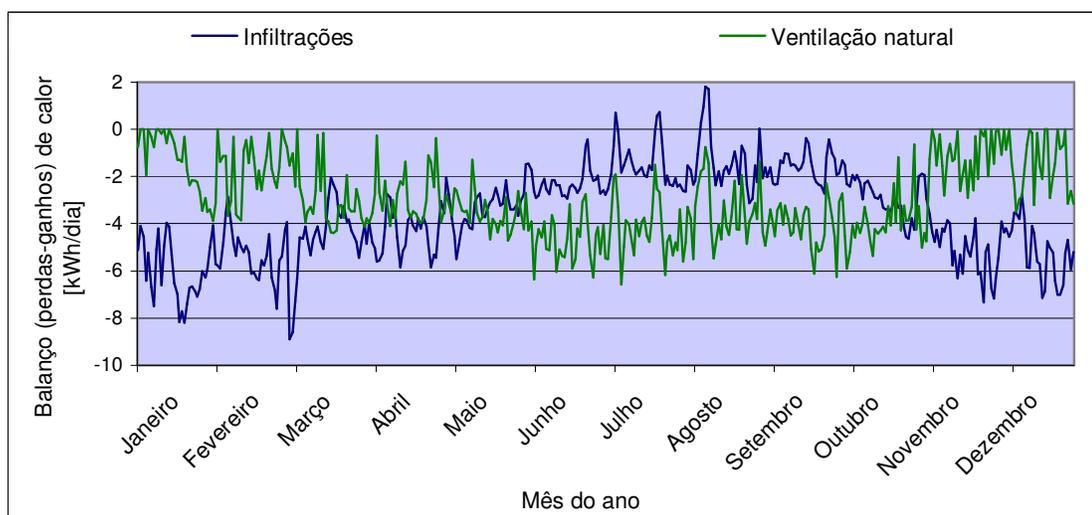


Figura 5.15- Balanço de calor diário devido a infiltrações e ventilação natural [kWh/dia].

Na cobertura existem ganhos de calor nos meses mais quentes, principalmente devido à radiação solar directa, e existem perdas de calor nos meses mais frios quando a temperatura interior da moradia é superior à temperatura exterior. No pavimento existem maioritariamente perdas de calor, porque, para as condições climáticas de Coimbra, a temperatura do solo ao longo do ano é quase sempre inferior à temperatura no interior da moradia (Figura 5.16).

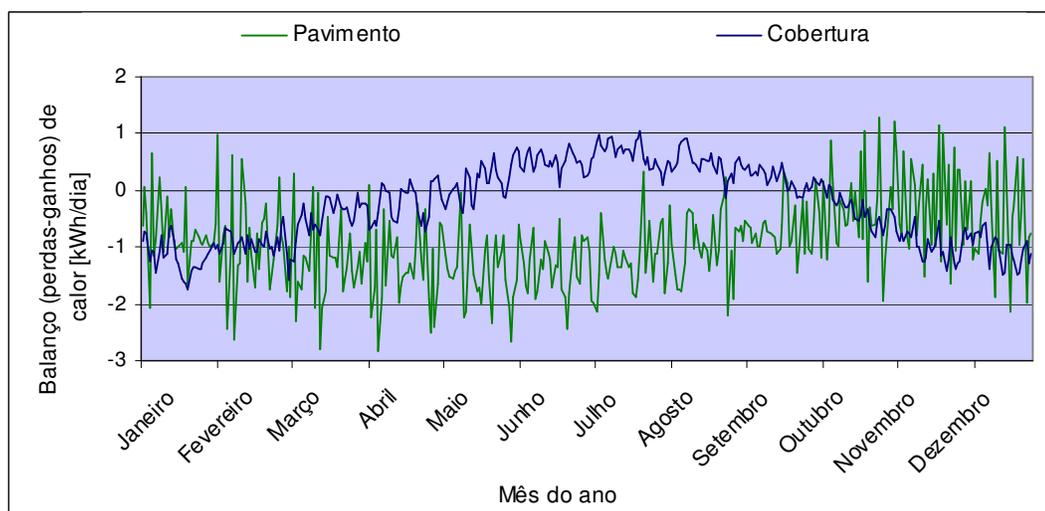


Figura 5.16- Balanço de calor diário pelo pavimento e cobertura [kWh/dia].

Os ganhos de calor dos envidraçados e da parte opaca das paredes exteriores ocorrem principalmente devido à radiação solar directa e as perdas de calor ocorrem quando a temperatura interior da moradia é superior à temperatura exterior (Figura 5.17).

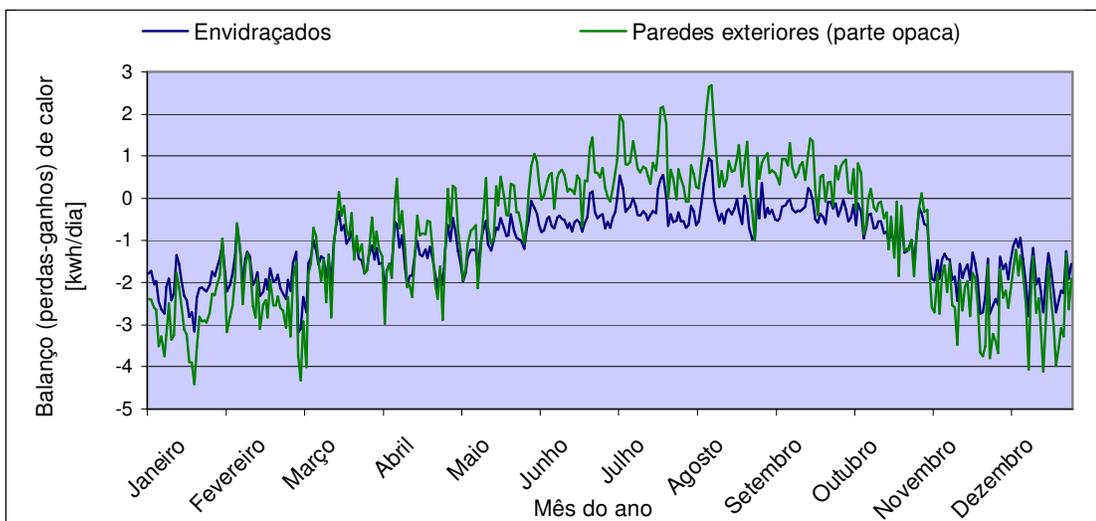


Figura 5.17- Balanço de calor diário pelos envidraçados e paredes exteriores [kWh/dia].

O balanço de calor da cobertura e paredes exteriores, inclui o balanço de calor devido a pontes térmicas, que é respectivamente $-0,6 \text{ kWh/m}^2\text{ano}$ e $-2,3 \text{ kWh/m}^2\text{ano}$ para cada um destes elementos (Figura 5.18).

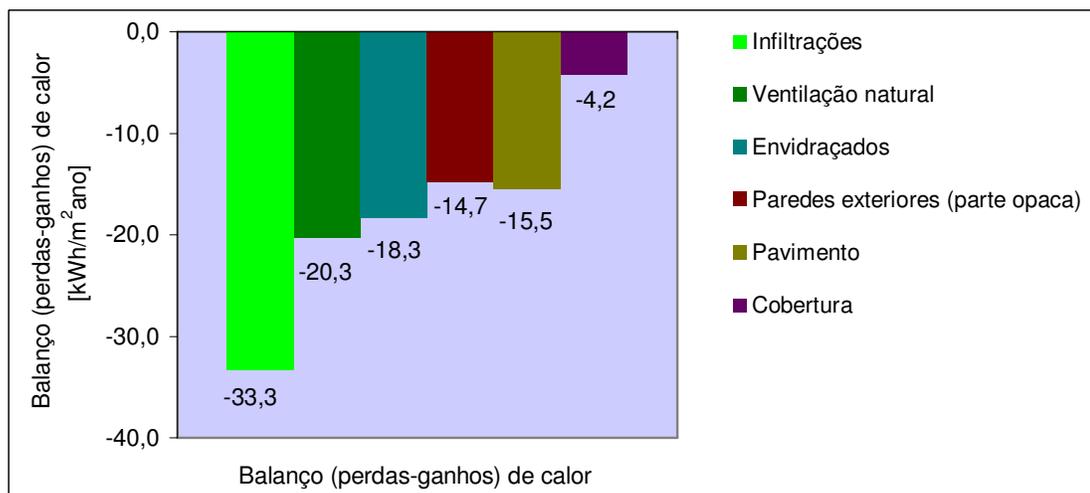


Figura 5.18- Balanço de calor anual pela envolvente exterior [kWh/m²ano].

5.4.7 Consumo de energia

Os electrodomésticos, iluminação, aquecimento e arrefecimento mecânico, consomem electricidade. As águas quentes sanitárias consomem gás natural.

O consumo de energia útil para aquecimento ($11,0 \text{ kW/m}^2\text{ano}$) e o consumo de energia útil para arrefecimento ($2,5 \text{ kW/m}^2\text{ano}$) é inferior ao permitido pela norma Passivhaus ($15 \text{ kW/m}^2\text{ano}$ para aquecimento e $15 \text{ kW/m}^2\text{ano}$ para arrefecimento).

O consumo de energia primária ($67,2 \text{ kWh/m}^2\text{ano}$) é inferior ao permitido pela norma Passivhaus ($120 \text{ kWh/m}^2\text{ano}$) (Figura 5.19).

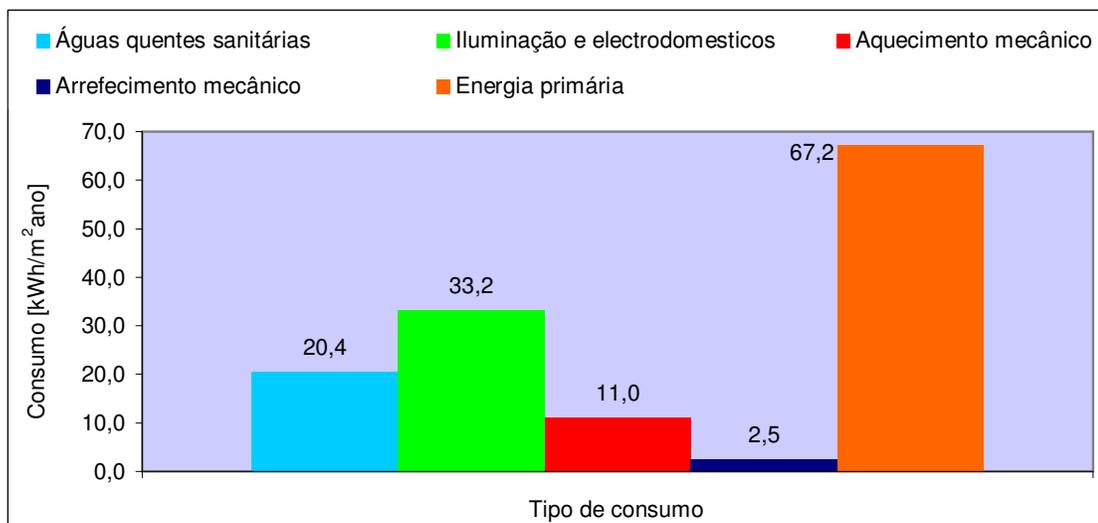


Figura 5.19- Tipo de consumo anual de energia [kWh/m²ano].

5.5 Análise paramétrica

5.5.1 Influência da orientação do edifício

De modo a verificar a influência da orientação da moradia manteve-se a solução construtiva da análise base e alterou-se a orientação da fachada com a maior área de envidraçados, que na análise base encontra-se orientada a Sul.

No caso 1, a fachada com maior área de envidraçados encontra-se orientada a Norte, no caso 2 essa fachada está orientada a Oeste e no caso 3 está orientada a Este (Quadro 5.10).

Quadro 5.10- Orientação dos envidraçados nos diferentes casos.

Caso	Sul [m ²]	Norte [m ²]	Oeste [m ²]	Este [m ²]
Análise base	2,88	1,98	0,00	0,00
Caso 1	1,98	2,88	0,00	0,00
Caso 2	0,00	0,00	2,88	1,98
Caso 3	0,00	0,00	1,98	2,88

Em comparação com a análise base, o caso 1 tem um maior consumo com aquecimento devido a ter uma menor área de envidraçados na fachada Sul e maiores perdas de calor pela fachada Norte no Inverno. O consumo com arrefecimento é menor devido aos menores ganhos de calor por radiação solar directa nas estações quentes. O caso 2 e o caso 3 têm maiores consumos com aquecimento porque não têm envidraçados na fachada Sul e as perdas de calor durante o Inverno pelos envidraçados orientados a Este e Oeste são maiores. Estes casos têm maiores consumos com arrefecimento porque no Verão os envidraçados das fachadas Oeste e Este provocam sobreaquecimento durante algumas horas (Figura 5.20).

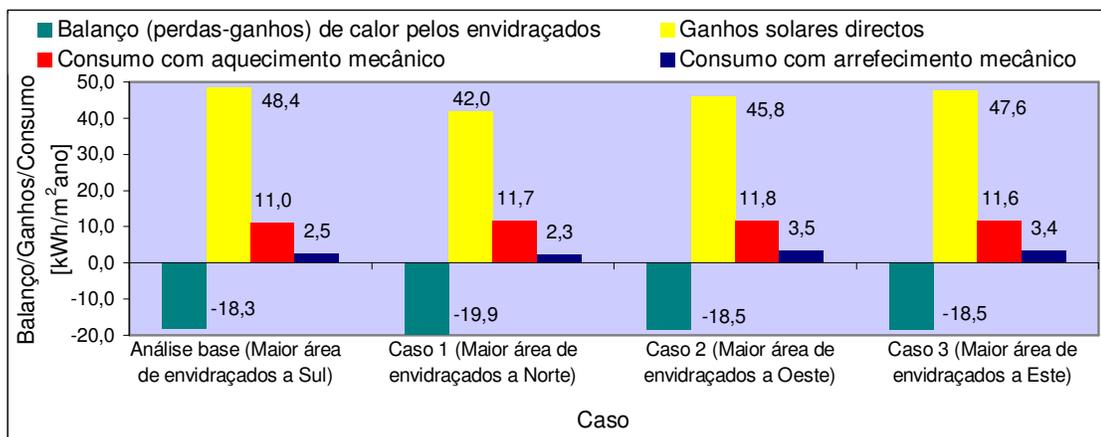


Figura 5.20- Influência da orientação do edifício no consumo de energia útil [kWh/m²ano].

5.5.2 Influência do nível de isolamento térmico

De modo a verificar a influência do isolamento térmico, manteve-se a solução construtiva da análise base, alterando apenas o nível de isolamento térmico da envolvente exterior. Nas paredes exteriores diminui-se a espessura da camada de lã de rocha até 60mm e aumenta-se a espessura da caixa-de-ar, de modo a manter a área útil. Na cobertura diminui-se a espessura de XPS até 60mm e aumenta-se a espessura da caixa-de-ar, de modo a manter o pé direito. No pavimento diminui-se a espessura da camada de XPS até 60mm (Quadro 5.11).

Quadro 5.11- Variação do nível de isolamento da envolvente exterior.

Caso	Cobertura			Paredes exteriores			Pavimento		
	Camada	Espessura [mm]	U [W/m²K]	Camada	Espessura [mm]	U [W/m²K]	Camada	Espessura [mm]	U [W/m²K]
Análise base	Gravilha	15,00	0,225	Reboco	5,00	0,282	Soalho de madeira	20,00	0,283
	XPS	60,00		EPS	30,00		Betão	100,00	
	Asfalto	10,00		OSB	10,00		XPS	100,00	
	OBS	10,00		Caixa-de-ar	20,00		Gravilha	50,00	
	Caixa-de-ar	70,00		Lã de rocha	120,00		Regularização	50,00	
	Lã de rocha	120,00		Gesso cartonado	15,00				
	Gesso cartonado	15,00							
Caso 4	Gravilha	15,00	0,274	Reboco	5,00	0,352	Soalho de madeira	20,00	0,283
	XPS	60,00		EPS	30,00		Betão	100,00	
	Asfalto	10,00		OSB	10,00		XPS	100,00	
	OBS	10,00		Caixa-de-ar	40,00		Gravilha	50,00	
	Caixa-de-ar	90,00		Lã de rocha	100,00		Regularização	50,00	
	Lã de rocha	100,00		Gesso cartonado	15,00				
	Gesso cartonado	15,00							
Caso 5	Gravilha	15,00	0,296	Reboco	5,00	0,401	Soalho de madeira	20,00	0,340
	XPS	60,00		EPS	30,00		Betão	100,00	
	Asfalto	10,00		OSB	10,00		XPS	80,00	
	OBS	10,00		Caixa-de-ar	60,00		Gravilha	50,00	
	Caixa-de-ar	110,00		Lã de rocha	80,00		Regularização	50,00	
	Lã de rocha	80,00		Gesso cartonado	15,00				
	Gesso cartonado	15,00							

Caso 6	Gravilha	15,00	0,307	Reboco	5,00	0,427	Soalho de madeira	20,00	0,378
	XPS	60,00		EPS	30,00		Betão	100,00	
	Asfalto	10,00		OSB	10,00		XPS	70,00	
	OBS	10,00		Caixa-de-ar	70,00		Gravilha	50,00	
	Caixa-de-ar	120,00		Lã de rocha	70,00		Regularização	50,00	
	Lã de rocha	70,00		Gesso cartonado	15,00				
	Gesso cartonado	15,00							
Caso 7	Gravilha	15,00	0,318	Reboco	5,00	0,453	Soalho de madeira	20,00	0,425
	XPS	60,00		EPS	30,00		Betão	100,00	
	Asfalto	10,00		OSB	10,00		XPS	60,00	
	OBS	10,00		Caixa-de-ar	80,00		Gravilha	50,00	
	Caixa-de-ar	130,00		Lã de rocha	60,00		Regularização	50,00	
	Lã de rocha	60,00		Gesso cartonado	15,00				
	Gesso cartonado	15,00							
Legenda:									
Alterações em relação à análise base									

A norma Passivhaus é cumprida para o caso 4, caso 5 e caso 6, já que o consumo de energia útil com aquecimento ou arrefecimento é inferior a 15 kWh/m²ano.

No caso 7 o consumo de energia útil com aquecimento é superior a 15 kWh/m²ano, e portanto a norma Passivhaus não é cumprida (Figura 5.21).

O consumo de energia útil com aquecimento e arrefecimento é crescente porque com a diminuição do nível de isolamento térmico há maiores trocas de calor com o exterior. O que durante os meses mais quentes resulta num maior consumo de energia útil com arrefecimento e nos meses mais frios com aquecimento.

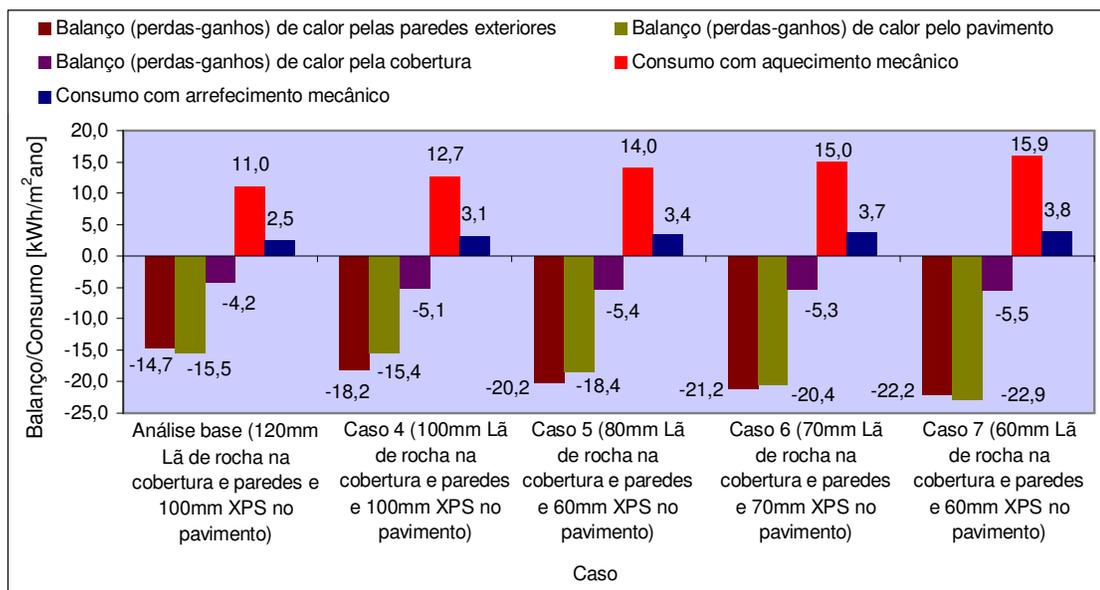


Figura 5.21- Influência do nível de isolamento no consumo de energia útil [kWh/m²ano].

De modo a verificar a influência das pontes térmicas, apresenta-se no quadro seguinte (Quadro 5.12) o balanço de calor das pontes térmicas e a comparação entre o coeficiente de transmissão térmica equivalente sem considerar as pontes térmicas ($U_{s,p.t.}$) e o coeficiente de transmissão térmica equivalente (U), que inclui o efeito das pontes térmicas e que foi utilizado na análise paramétrica.

Quadro 5.12- Efeito das pontes térmicas na cobertura e paredes exteriores.

Caso	Cobertura				Paredes exteriores			
	$U_{s,p.t.}$ [W/m ² K]	U [W/m ² K]	Aumento de U [%]	Balanço de calor [kWh/m ² ano]	$U_{s,p.t.}$ [W/m ² K]	U [W/m ² K]	Aumento de U [%]	Balanço de calor [kWh/m ² ano]
Análise base	0,191	0,225	17,80	-0,6	0,235	0,282	20,00	-2,3
Caso 4	0,208	0,274	31,73	-1,1	0,266	0,352	32,33	-4,3
Caso 5	0,236	0,296	25,42	-1,1	0,306	0,401	31,04	-4,5
Caso 6	0,250	0,307	22,80	-0,8	0,332	0,427	29,50	-4,4
Caso 7	0,267	0,318	19,10	-0,7	0,362	0,453	25,14	-4,2

5.5.3 Influência dos envidraçados

De modo a verificar a influencia dos envidraçados no consumo energético do edifício, mantém-se a solução construtiva da análise base, excepto as janelas, para as quais são analisadas varias soluções (Quadro 5.13).

No caso 8 a geometria das janelas continua a ser a mesma da análise base mas utiliza-se outro tipo de envidraçados (vidro duplo baixo emissivo com argon). No caso 9 aumenta-se a área das janelas da fachada Sul para 20% da área dessa fachada (na análise base essas janelas possuíam 9,6% da área da fachada). No caso 10 a área de envidraçados continua a ser 20% da área da fachada Sul e opta-se por um vidro mais eficiente energeticamente (Quadro 5.14).

Quadro 5.13- Variação dos envidraçados.

Caso	Divisão	Orientação	Largura [m]	Altura [m]	Tipo de vidro
Análise base	Cozinha/sala	Sul	0,9	2,10	Vidro duplo incolor (8-10-6)
		Norte	0,9	1,10	
	Quarto	Sul	0,9	1,10	
	Casa de banho	Norte	0,9	1,10	
Caso 8	Cozinha/sala	Sul	0,9	2,10	Vidro duplo baixo emissivo com argon (8-10-6)
		Norte	0,9	1,10	
	Quarto	Sul	0,9	1,10	
	Casa de banho	Norte	0,9	1,10	
Caso 9	Cozinha/sala	Sul	1,66	2,10	Vidro duplo incolor
		Norte	0,9	1,10	

	Quarto	Sul	1,66	1,10	(8-10-6)
	Casa de banho	Norte	0,9	1,10	
Caso 10	Cozinha/sala	Sul	1,66	2,10	Vidro duplo baixo emissivo com argon (8-10-6)
		Norte	0,9	1,10	
	Quarto	Sul	1,66	1,10	
	Casa de banho	Norte	0,9	1,10	

Quadro 5.14- Vidro duplo baixo emissivo com argon.

Elemento	Camada	Espessura [mm]	(g_{LV})	(g_{\perp})	U [W/m^2C]
Vidro duplo baixo emissivo com argon (8-10-6)	Vidro exterior	8,00	0,571	0,171	1,354
	Caixa-de-ar	10,00			
	Vidro interior	6,00			
Caixilharia	PVC (sem corte térmico)	-	-	-	3,476

No caso 8, em relação a análise base, os ganhos solares diminuem, porque o factor solar do vidro diminui (passa de $g_{LV}=0,715$ na análise base para $g_{LV}=0,571$ no caso 9). O consumo de energia útil com aquecimento e arrefecimento mecânico também diminui porque o coeficiente de transmissão térmica do vidro diminui (passa de $U_V=2,76 W/m^2C$ na análise base para $U_V=1,354 W/m^2C$ no caso 9), logo existem menos perdas de calor pelos envidraçados (Figura 5.22).

No caso 9 aumentam os ganhos solares devido a ter-se aumentado a área de envidraçados, mas também aumenta o consumo de energia útil com aquecimento e arrefecimento mecânico, porque passou a haver uma maior área com o coeficiente de transmissão térmica das janelas ($U_V=2,76 W/m^2C$) que é superior ao coeficiente de transmissão térmica da parte opaca das paredes exteriores ($U=0,282 W/m^2C$).

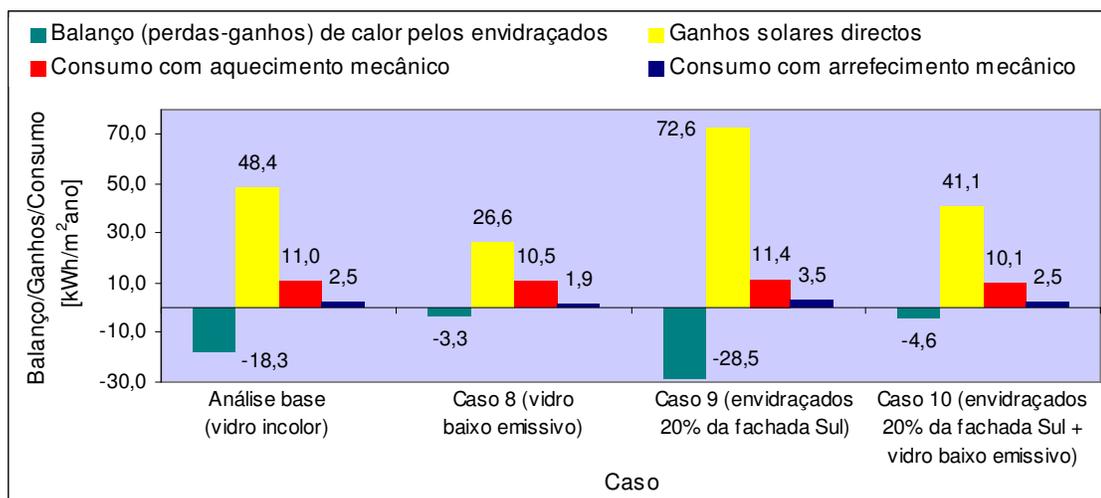


Figura 5.22- Influência dos envidraçados no consumo de energia útil [kWh/m²ano].

No caso 11 manteve-se a solução construtiva da análise base, mas utilizou-se o nível de isolamento térmico do caso 6 e os envidraçados do caso 8. No caso 12 utilizou-se o nível de isolamento térmico do caso 7 e os envidraçados do caso 10.

Em termos energéticos a utilização de vidro duplo baixo emissivo apenas é vantajosa caso se aumente a área de envidraçados da fachada Sul para 20% da área dessa fachada, já que esta solução permite diminuir a espessura da camada de lã de rocha no pavimento e paredes exteriores até 60mm e a espessura de XPS no pavimento até 60mm.

Caso se utilize o vidro duplo baixo emissivo, mas mantenha-se a área de envidraçados da fachada Sul em 9,6% da área dessa fachada, a utilização deste tipo de vidro não é vantajosa, já que apenas é possível diminuir a espessura da camada de lã de rocha no pavimento e paredes exteriores até 70mm e a espessura de XPS no pavimento até 70mm, o que já era conseguido utilizando o vidro duplo incolor (Figura 5.23).

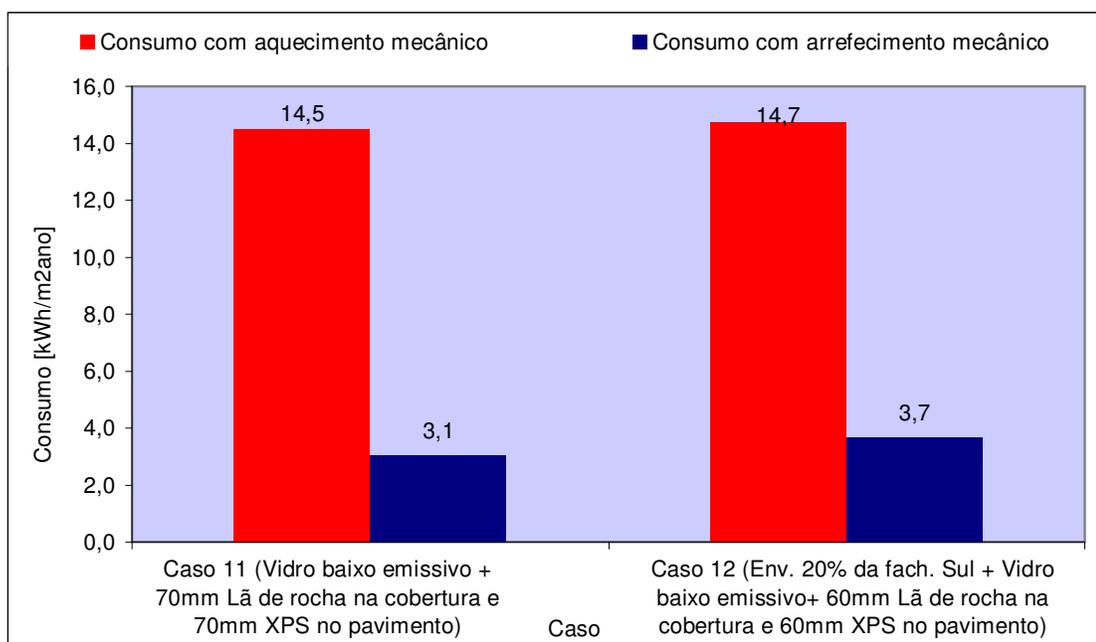


Figura 5.23- Influência dos vidros duplos baixos emissivos no nível de isolamento térmico [kWh/m²ano].

5.5.4 Influência do sistema de ventilação

De modo a verificar a influência do sistema de ventilação, manteve-se a solução construtiva da análise base, e no caso 13, trocou-se a ventilação natural (abertura de janelas) por um sistema de ventilação mecânico com recuperação de calor (com 75% de eficiência) que fornece apenas o número de renovações por hora necessárias para manter o conforto interior.

No caso 14, utilizou-se o sistema de ventilação mecânico com recuperação de calor como complemento da ventilação natural (sendo apenas activado se a ventilação natural não for suficiente para satisfazer as condições interiores de conforto) (Figura 5.24).

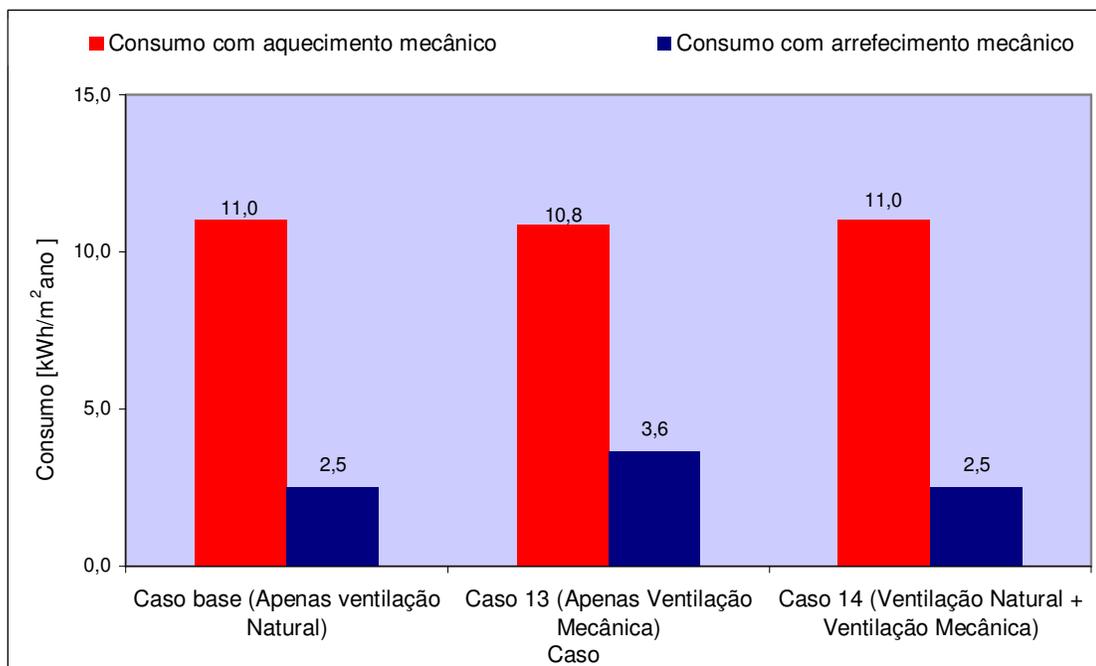


Figura 5.24- Influência do sistema de ventilação no consumo de energia útil [kWh/m²ano].

Em comparação com a análise base, no caso 13 diminui o consumo de energia útil para aquecimento, já que o uso de ventilação mecânica permite manter o ar quente dentro da moradia durante maiores períodos, porque deixa de ser necessário abrir as janelas.

O consumo de energia útil com o arrefecimento aumenta no caso 13, porque existem apenas perdas de calor por infiltração e pontes térmicas, deixando de existir perdas de calor devido à abertura de janelas, o que faz aumentar a temperatura interior.

O caso 14 comprova que o sistema de ventilação natural é suficiente para manter as condições interiores de conforto, já que este caso tem um consumo de energia útil igual ao caso base, o que indica que não é necessário activar o sistema de ventilação mecânico.

5.5.5 Influência da impermeabilidade ao ar

Na análise base considerou-se que as infiltrações eram responsáveis por 0,6 renovações por hora. No caso 16, manteve-se a solução construtiva da análise base, mas considerou-se uma execução menos eficiente e assumiu-se que a envolvente exterior permitia 1,0 renovação por hora, devido a infiltrações (limite máximo permitido pela norma Passivhaus).

No caso 16, o consumo de energia útil com aquecimento é superior porque existem mais perdas térmicas pela envolvente exterior, devido à execução menos eficiente. O consumo de energia útil com o arrefecimento é superior porque nos meses quentes a entrada de calor devido a infiltrações é maior do que na análise base (Figura 5.25).

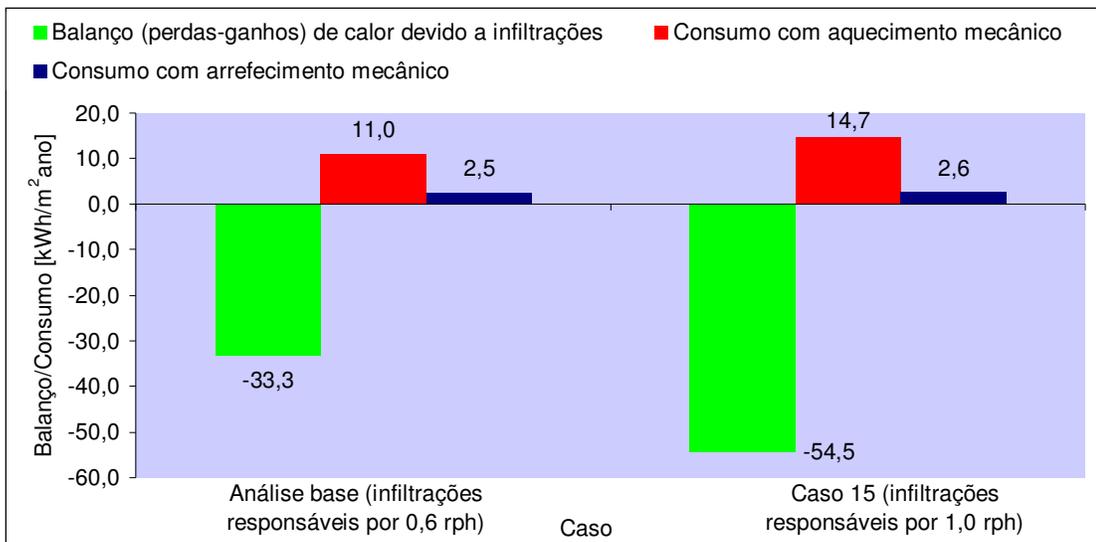


Figura 5.25- Influência da impermeabilidade ao ar no consumo de energia útil [kWh/m² ano].

5.5.6 Influência da inércia térmica

De modo a verificar a influência da inércia térmica, manteve-se a solução construtiva da análise base, e no caso 16 alterou-se a posição das camadas de XPS da cobertura e de EPS nas paredes exteriores que na análise base se encontravam colocadas pelo exterior e no caso 16 colocaram-se pelo interior (Figura 5.26).

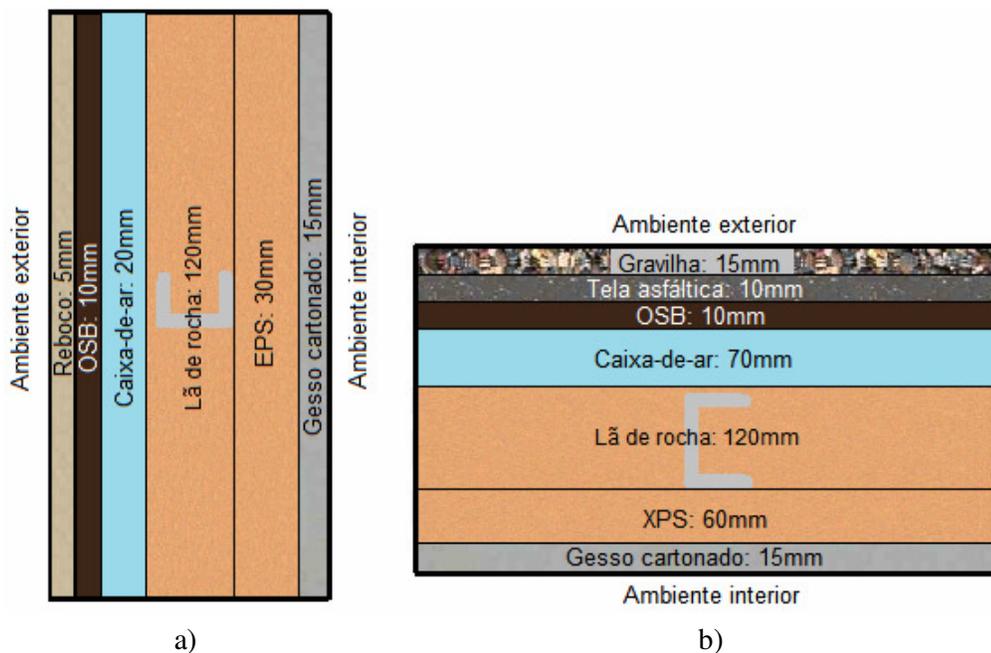


Figura 5.26- Alteração do isolamento térmico em relação à análise base na: a) Parede exterior; b) Cobertura.

Em relação à análise base, no caso 16 o consumo de energia útil com aquecimento é superior porque a capacidade de absorver calor é inferior (menor massa térmica). O consumo de energia útil com arrefecimento é superior porque com a diminuição da inércia térmica a temperatura interior atinge valores mais elevados durante o verão (Figura 5.27).

As trocas de calor pela envolvente exterior são idênticas nos dois casos porque os coeficientes de transmissão térmica dos elementos da envolvente exterior são iguais para os dois casos.

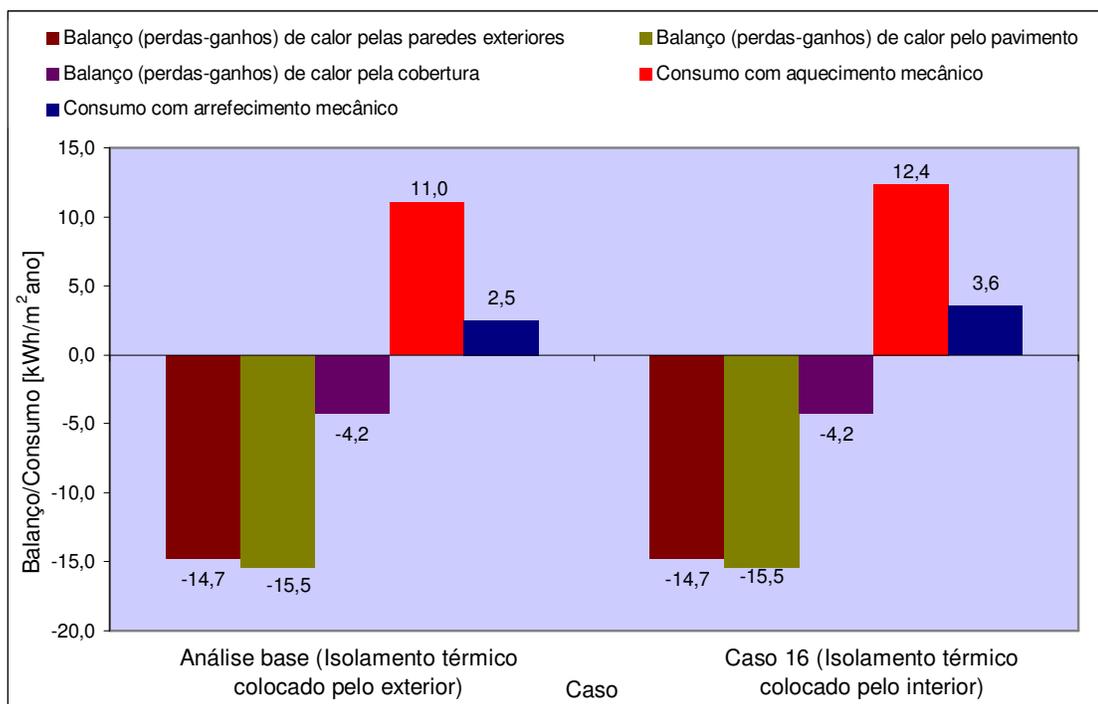


Figura 5.27- Influência da inércia térmica no consumo de energia útil [kWh/m²ano].

5.5.7 Emissões de CO₂ resultantes do consumo energético

As emissões de CO₂ (Figura 5.28) resultam do consumo de gás natural e electricidade (através de um factor de emissão, que determina o dióxido de carbono que é emitido durante a produção de electricidade que será posteriormente consumida pelo sector residencial).

As emissões de CO₂ variam consoante a eficácia energética da solução adoptada. Em comparação com a análise base, as emissões de CO₂ diminuem com o uso de vidro duplo baixo emissivo e aumentam com o uso de ventilação mecânica e com a diminuição do nível de isolamento térmico, já que o consumo de energia com aquecimento e arrefecimento aumenta.

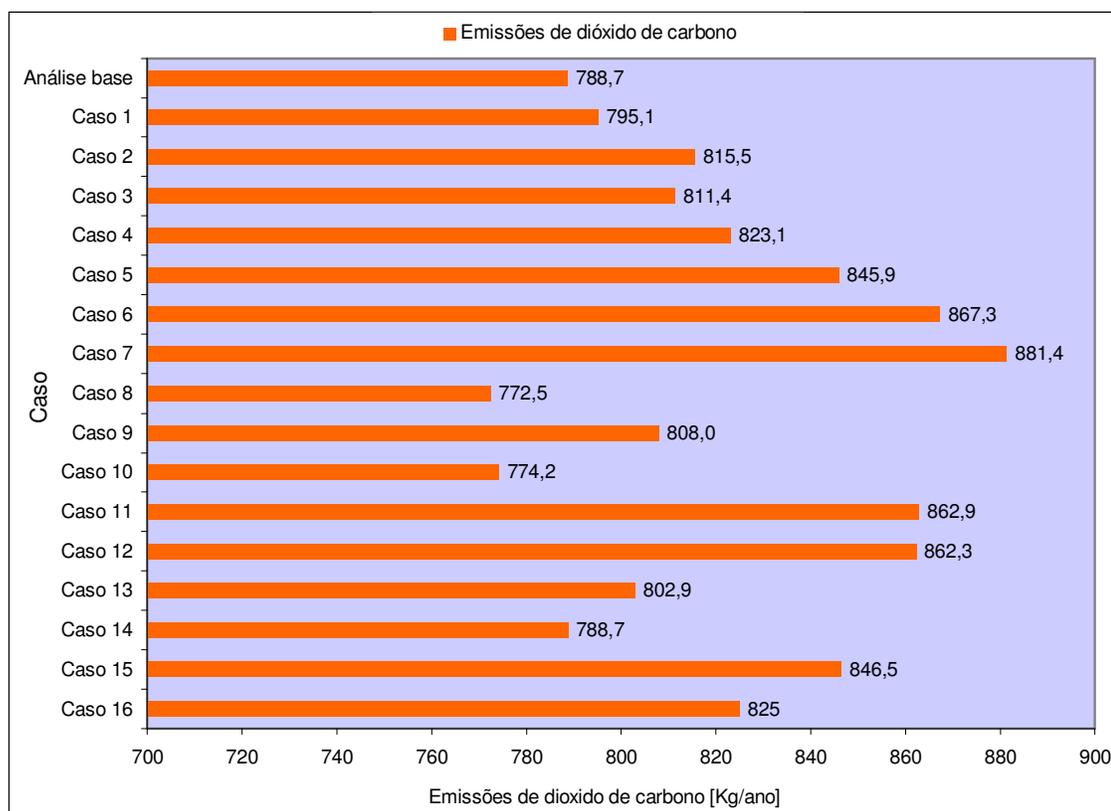


Figura 5.28- Emissões de dióxido de carbono para os diferentes casos [kg/ano].

5.5.8 Energia incorporada dos materiais

De acordo com a norma Passivhaus, nos capítulos anteriores considerou-se apenas a energia operacional (aquecimento, arrefecimento, águas quentes sanitárias, iluminação, etc.) no consumo energético da moradia Mini-Haven.

De facto os consumos energéticos devem-se maioritariamente a esta parcela de energia e todas as normas Europeias, incluindo a Passivhaus, apontam para a sua diminuição (recorrendo principalmente ao aumento do nível de isolamento térmico) como forma de obter a eficiência energética pretendida.

Contudo a construção de edifícios cada vez mais eficientes (como as casas “Passivhaus”), e conseqüente diminuição do consumo de energia operacional, faz com que a energia incorporada dos materiais (energia consumida na extracção, fabrico e transporte dos materiais), tenha cada vez mais relevância.

Tal facto pode ser comprovado através do quadro seguinte (Quadro 5.15), onde se observa que o consumo de energia incorporada cresce com o aumento do nível de isolamento térmico e pode atingir até 35,3% do consumo total de energia (incorporada + operacional) para o caso de estudo (dados no ANEXO D).

A energia recuperada no fim de vida dos materiais deve-se à sua incineração, principalmente da lã de rocha e XPS. Assim esta parcela diminui com o aumento do nível de isolamento térmico, já que para maiores quantidades de isolamento é necessário um maior consumo de

energia durante o processo de incineração. A energia recuperada durante a reciclagem deve-se à reutilização dos materiais, principalmente do aço.

Nesta análise foi considerada uma vida útil de 50 anos para a moradia e assumiu-se que neste período não era necessária a sua manutenção. A análise foi efectuada com recurso ao software GaBi 6, versão 5.56 (GaBi@, 2013), que permite analisar o ciclo de vida dos materiais desde a sua extracção até ao seu fim de vida (incluindo a sua reciclagem).

Quadro 5.15- Consumo de energia incorporada e operacional durante a vida útil (50 anos) para diferentes casos.

Caso	Energia Operacional	Energia incorporada dos materiais				
	Total [MJ/m ²]	Construção [MJ/m ²]	Fim de vida [MJ/m ²]	Reciclagem [MJ/m ²]	Total [MJ/m ²]	Percentagem de energia [%]
Análise base	12095,0	6975,0	-78,8	-294,2	6602,0	35,3
Caso 4	12498,6	6813,9	-78,9	-294,1	6440,9	34,0
Caso 5	12772,5	6726,5	-79,0	-294,1	6353,4	33,2
Caso 6	13029,2	6682,9	-79,1	-294,1	6309,7	32,6
Caso 7	13198,0	6639,2	-79,1	-294,1	6266,0	32,2

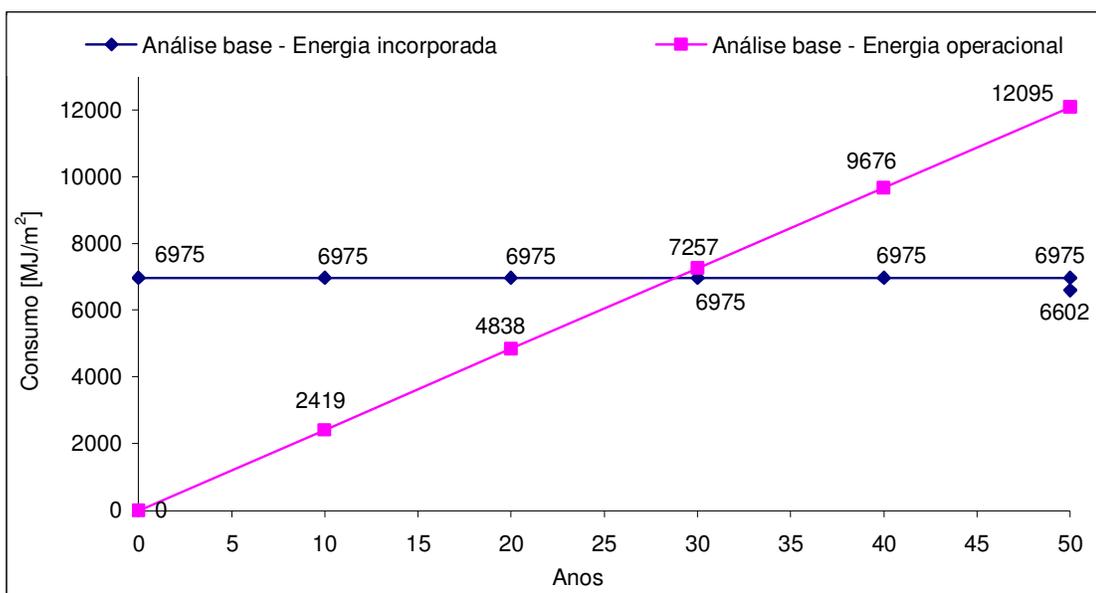


Figura 5.29- Consumo de energia incorporada e operacional durante a vida útil (50 anos) para a análise base [MJ/m²].

6 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

6.1 Conclusões

Nesta dissertação estudou-se a aplicabilidade da Norma Passivhaus, ao clima de Coimbra através da aplicação de soluções construtivas correntes para uma moradia unifamiliar, com estrutura em aço leve. Apresentam-se de seguida as principais conclusões obtidas durante a realização deste trabalho.

Os resultados obtidos indicam que é possível cumprir para o caso de estudo os limites estabelecidos pela norma Passivhaus para o consumo de energia primária e consumo de energia útil com aquecimento e arrefecimento. A solução mais adequada deve ter em conta as condições climáticas do local, a geometria do edifício, a exposição solar, os sistemas de climatização e o nível de isolamento adequado.

A exposição solar mais adequada é aquela que apresente a fachada com maior área de envidraçados orientada a Sul. A orientação da maior área de envidraçados a Este ou Oeste cria sobreaquecimento durante alguns períodos no Verão. A orientação da maior área de envidraçados a Norte, Este ou Oeste faz aumentar as perdas de calor pelos envidraçados durante o Inverno.

Para os casos estudados, o uso de vidros duplos com capas de baixa emissividade diminui os consumos de energia útil, mas a sua utilização não é essencial para cumprir a Norma Passivhaus. Em certas ocasiões o uso deste tipo de envidraçados pode ser prejudicial para o desempenho energético do edifício. Tal acontece devido ao menor coeficiente de transmissão térmica destes vidros, que poderá não compensar a diminuição do seu factor solar. Assim apesar de o menor valor do coeficiente de transmissão térmica aumentar a resistência à condução de calor, reduzindo as perdas térmicas, a redução do factor solar diminui o aproveitamento dos ganhos solares, o que nos meses mais frios, faz aumentar as necessidades de energia útil com aquecimento.

O isolamento térmico tem uma contribuição fundamental para a redução do consumo de energia útil. Para o caso de estudo é possível cumprir a Norma Passivhaus utilizando espessuras de isolamento correntes das casas Passivhaus situadas no Sul da Europa. A opção pelo tipo de solução construtiva deve ter em conta o seu custo, dificuldade de execução e durabilidade. Assim na cobertura e pavimento utilizou-se XPS em vez de EPS devido à maior

resistência mecânica do XPS. Optou-se pela cobertura invertida para aumentar a durabilidade da camada de impermeabilização. A cobertura tem o maior nível de isolamento térmico por ser o elemento da envolvente exterior por onde ocorrem as maiores perdas térmicas.

As pontes térmicas fazem aumentar significativamente as necessidades energéticas do edifício em estudo, porque potencia a entrada de calor pela envolvente exterior durante os meses mais quentes e a perda de calor pela envolvente exterior durante os meses mais frios. As pontes térmicas analisadas ocorrem devido à estrutura em aço e podem ser corrigidas usando isolamento térmico contínuo. Como consequência disso colocou-se isolamento térmico pelo exterior, XPS na cobertura e EPS nas paredes exteriores, e na caixa-de-ar optou-se por lã de rocha que se molda melhor à estrutura metálica do que o XPS ou EPS.

Para o caso de estudo, as condições climáticas de Coimbra permitem que seja usada apenas a ventilação natural. Principalmente durante o Verão onde a perda de calor com a abertura de janelas é suficiente para obter o arrefecimento desejado. No Inverno a ventilação natural também é suficiente para manter as condições de conforto, mas em certos casos a ventilação mecânica com recuperação de calor será mais eficiente, já que a abertura de janelas pode originar entrada de ar frio para o interior da moradia.

O nível de permeabilidade ao ar do edifício, influencia significativamente o consumo de energia útil. Uma execução apropriada, que diminua a imperfeições resultantes da construção é essencial para diminuir esse consumo, principalmente a energia útil para aquecimento.

A energia incorporada, no caso de estudo, representa uma parcela significativa da energia consumida ao longo do ciclo de vida da moradia. As formas mais eficientes de diminuir esta parcela de energia passam por aumentar o ciclo de vida dos imóveis, utilizar materiais construtivos que estejam disponíveis próximo do local de construção, que sejam recicláveis e que necessitem de poucos recursos (reduzindo emissões, resíduos, etc.) na sua produção.

6.2 Trabalhos futuros

A norma Passivhaus para os climas mais quentes surge de um esforço Europeu em adoptar uma norma concebida para climas frios à generalidade dos climas temperados e quentes Europeus. Como tal esta norma tem alguns requisitos que não são os mais indicados para Portugal. Como o número de renovações por hora permitido para as infiltrações (superiores ao permitido pelo RCCTE), e a não imposição do uso de energias renováveis (Segundo o RCCTE o uso de colectores solares é obrigatório sempre que haja condições para tal). E outros requisitos, como os coeficientes de transmissão térmica para a envolvente exterior opaca e janelas, são omissos. Futuramente seria interessaste juntar a norma Portuguesa, o RCCTE, aos princípios da norma Passivhaus, de modo a obter os dados omissos e melhorar os dados demasiados permissivos da norma Passivhaus.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Passive-On Project (2007a). “A descrição longa do Passive-On”. European Commission under the Intelligent Energy – Europe Programme.

Passive-On Project (2007b). “Na direcção de casas passivas – Mecanismos de apoio ao desenvolvimento do mercado de casas passivas”. European Commission under the Intelligent Energy – Europe Programme.

Cardoso, Filipa e Ascenso, Rita (2011). “Passivhaus, As novas casas passivas”. Climatização – Edifícios e Energia.

Passive-On Project (2007c). “A norma Passivhaus em climas quentes da Europa – Directrizes de projecto para casas confortáveis de baixo consumo energético, Parte 1: Revisão de casas confortáveis de baixo consumo energético”. European Commission under the Intelligent Energy – Europe Programme.

Ascenso, Rita (2011). “Passivhaus “Este método está muito bem sistematizado””. Climatização – Edifícios e Energia.

Cunha, Rui (2012). “Casa em Ílhavo será quase autónoma em termos energéticos”. Diário de Aveiro, 13-08-2012.

Taylor, Michael (2011) “O papel das bombas de calor”. Climatização – Eficiência e Energia.

Mendonça, Paulo (2005). “Habitar sob uma segunda pele: estratégias para a redução do impacto ambiental de construções solares passivas em climas temperados” Tese de doutoramento, Departamento de Engenharia Civil da Universidade do Minho, Guimarães.

Lanham, Ana; Gama, Pedro e Braz, Renato. (2004) “Arquitectura Bioclimática: Perspectivas de inovação e futuro”. Seminários de Inovação. Lisboa, 14 Junho de 2004.

Gonçalves, Hélder e Graça, João Mariz (2004). “Conceitos Bioclimáticos para edifícios em Portugal”. Departamento de energias renováveis – INETI. Lisboa, Portugal.

Patrocinio, Teresa (2006). “Ficha técnica: Arquitectura Bioclimática” Construlink S.A.

Tavares, Juvêncio (2011). “Integração de Sistemas de Bombas de Calor Geotérmicas em Edifícios”. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade do Coimbra, Coimbra.

Brandão, Nuno (2008). “Análise de Soluções Construtivas e Tecnológicas para Edifícios Passivos em Portugal”. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade do Porto, Porto.

Coelho, Luís (2007). “Energia geotérmica aplicada aos sistemas energéticos de edifícios”. Seminário: O Sector da Energia Num Futuro Sustentável 29 de Outubro de 2007 – Caldas da Rainha, Portugal.

ADENE – Agencia para a energia (2001). “Certificação Energética e Ar Interior: Edifícios”. Algés, Portugal.

Isolani, Pieraldo (2008). “Eficiencia energética nos edificios residenciais”. Intelligent Energy Europe.

DGEG – Direcção geral de Energia e Geologia (2007). “Inquérito ao consumo de energia no sector doméstico: Edição 2011”. Lisboa, Portugal.

Gonçalves, Helder; Oliveira, Marta; Patricio, Anita; Cabrito, Pedro (1998). “Passive Solar Buildings in Portugal Experiences in the Last 20 years”. Department of Renewable Energies- INETI. Lisboa, Portugal.

Pinto, Paulo (2002). “Caracterização de barreiras pára-vapor e sua aplicação”. Dissertação apresentada para obtenção do grau de mestre em construção de edifícios na faculdade de engenharia da Universidade do Porto, Porto.

Torgal, Fernando; Jalali, Said (2011). “Energia incorporada em materiais de construção versus energia operacional”. ISSN 1645-5576. Nº27-JUN.2011 VOL.9.

A. Audenaert; S.H. De Cleyn and B. Vankerckhove (2008). “Economic analysis of passive houses and low-energy houses compared with standard houses”. Energy policy 36 (2008) 47–55.

Schnieders, Jürgen (2006). “Heat Load Calculations and Passive House Requirements in Northwest European Climates”. 10th international passive house conference 2006.

Schnieders, Jürgen and Hermelink, Andreas (2006). “CEPHEUS results: measurements and occupants’ satisfaction provide evidence for Passive Houses being an option for sustainable building”. Energy Policy 34 (2006) 151–171.

Judkoff, Ron; Polly, Ben; Bianchi, Marcus; Neymark, Joel and Kennedy, Mike (2011). “Building Energy Simulation Test for Existing Homes (BESTEST-EX): Instructions for Implementing the Test Procedure, Calibration Test Reference Results, and Example Acceptance-Range Criteria”. (NREL) National Renewable Energy Laboratory, Washington.

RCCTE (Decreto-Lei nº 80/2006), Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios, Diário da República nº 67 – I Série – A, 4 de Abril de 2006.

ISO 13790 (2007). “Energy performance of buildings - Calculation of energy use for space heating and cooling”. English version, ISO 13790:2007(E).

Passivhaus Institut@ (2013). <http://passiv.de/en/>. Passivhaus Institut (página internet oficial), Darmstadt.

Passive house international@ (2013). <http://www.passivehouse-international.org>. International passive house association (página internet oficial), Rheinstraße.

Minergie@ (2013). <http://www.minergie.ch>. Minergie (página internet oficial), Bern.

Effinergie@ (2013). <http://www.effinergie.org>. Effinergie (página internet oficial), Montpellier.

Class1 @ (2013). <http://www.class1.dk/>. Class1 (página internet oficial), Herlev.

Energia7@ (2013). <http://www.energia7.net/p/paineis-solares.html>. Paineis solares (página internet oficial), Algarve.

NotaPossitiva@ (2013). http://www.notapositiva.com/pt/geologia/11_energia_solar.htm. Energia solar (página internet oficial).

Projectista@ (2013a). <http://www.projectista.pt/wpcontent/uploads/2011/01/Styrofoam.pdf>. Coberturas planas invertidas (página internet oficial), Lisboa.

Projectista@ (2013b). <http://www.projectista.pt/wpcontent/uploads/2010/06/Paredes1.pdf>. Revestimento de paredes (página internet oficial), Lisboa.

Energiarenovável@ (2013). <http://energiarenovavel.webs.com/bombasdecalor.htm>. Bombas de calor geotérmicas (página internet oficial), Lisboa.

EnergyPlus@ (2013). <http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/>. EnergyPlus Energy Simulation Software (página internet oficial).

U.S. Department of Energy (2013). http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/cfm/weather_data3.cfm/region=6_europe_wmo_region_6/country=PRT/cname=Portugal. EnergyPlus Energy Simulation Software, Weather data (página internet oficial).

THERM (2013). <http://windows.lbl.gov/software/therm/therm.html>. THERM, Two-Dimensional Building Heat-Transfer Modeling (página internet oficial).

GaBi (2013). <http://www.gabi-software.com/international/software>. GaBi, Product Sustainability Performance (página internet oficial).

Cool-Haven (2013). <http://www.coolhaven.pt/produtos/mini-haven.php>. Moradia Mini-Haven, (página internet oficial).

ANEXOS

ANEXO A – Geometria da moradia Mini-Haven

ANEXO B – Limites impostos pelo RCCTE para a análise base

- Altitude: 20,3m (Câmara Municipal de Coimbra)
- Zona: V2 (Quadro III.1 e Quadro III.3 do RCCTE)
- Zona: I1 (Quadro III.1 e Quadro III.2 do RCCTE)
- Número de graus dia: 1460 (Quadro III.1 do RCCTE)

Valor limite das necessidades nominais de energia útil para arrefecimento (N_v):

- $N_v = 18 \text{ kWh/m}^2\text{ano}$ (Artigo 15º - alínea 2 do RCCTE)

Cálculo do valor limite das necessidades de energia útil para aquecimento (N_i)

Área das paredes exteriores (Medido pelo interior): $59,72\text{m}^2$

Área da cobertura (Medida pelo interior): $22,16\text{m}^2$

Área do pavimento exterior (Medido pelo interior): $22,16\text{m}^2$

Área total: $104,04 \text{ m}^2$

Área útil de pavimento (Medido pelo interior de cada compartimento): $21,9\text{m}^2$

Pé direito: 2,7m

Volume: $59,13\text{m}^3$

Factor de forma (FF) = $\frac{\text{Área total}}{\text{Volume}} = 1,76$ (Anexo II do RCCTE)

- $N_i = 4,05 + 0,06885GD = 104,57\text{kWh/m}^2\text{ano}$ (Artigo 15º - alínea 1 do RCCTE)

Cálculo do limite máximo das necessidades de energia para preparação das águas quentes sanitárias (N_a)

Numero de ocupantes: 2 pessoas (Quadro VI.1)

Consumo diário de referencia de AQS (M_{AQS}): 80l (Anexo VI – alínea 2.1 do RCCTE)

Numero de dias de ocupação: 365 dias

Área de pavimento (A_p): $22,16\text{m}^2$

- $N_a = 0,081.M_{AQS} \cdot nd / A_p = 106,73\text{kWh/m}^2\text{ano}$ (Artigo 15º - alínea 3 do RCCTE)

Valor limite das necessidades totais anuais de energia primária (N_t)

- $Nt = 0,9(0,01 Ni + 0,01 Nv + 0,15 Na) = 15,51 Kgep/m^2 ano$ (Artigo 15º - alínea 5 do RCCT)

Coefficientes de transmissão térmica máximos de elementos opacos da envolvente

- Paredes: $1,8 W/m^2°C$ (Quadro XI.1 do RCCTE)
- Cobertura: 1,2 (Quadro XI.1 do RCCTE)
- Pavimento: 1,65 (Quadro XI.1 do RCCTE)

Condições interiores de referencia

- Renovações por hora: 0,6 (Artigo 14º do RCCTE)
- Temperatura do ar na estação de aquecimento: $20°C$ (Artigo 14º do RCCTE)
- Temperatura do ar na estação de arrefecimento: $25°C$ (Artigo 14º do RCCTE)
- Humidade relativa média na estação de arrefecimento: $50°C$ (Artigo 14º do RCCTE)

Factor solar máximo dos vãos envidraçados (g_{\perp}):

- $g_{\perp} = 0,56$ (Para edifícios e inércia térmica média ou forte) (Quadro IX.2 do RCCTE)

ANEXO C – Horário de ocupação da moradia Mini-Haven

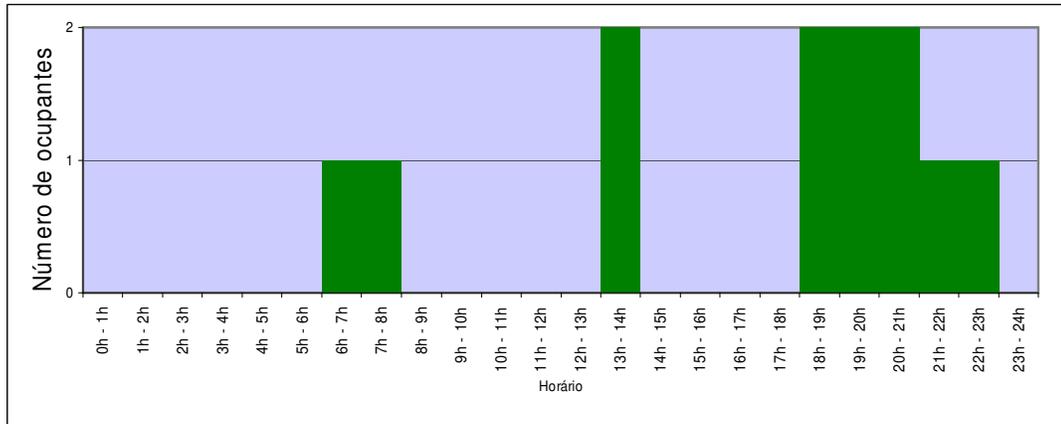


Figura C.1- Ocupação durante a semana da cozinha/sala [Número de ocupantes].

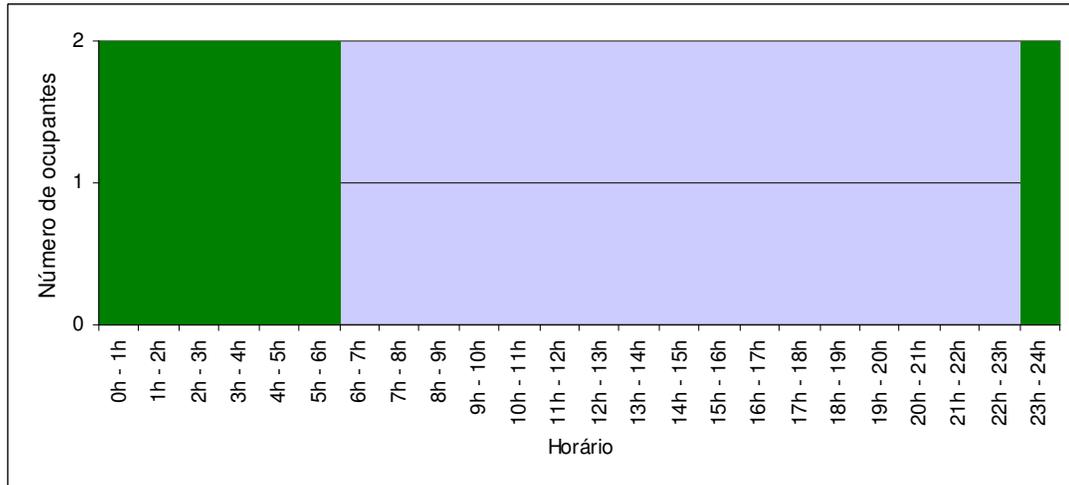


Figura C.2- Ocupação durante a semana do quarto [Número de ocupantes].

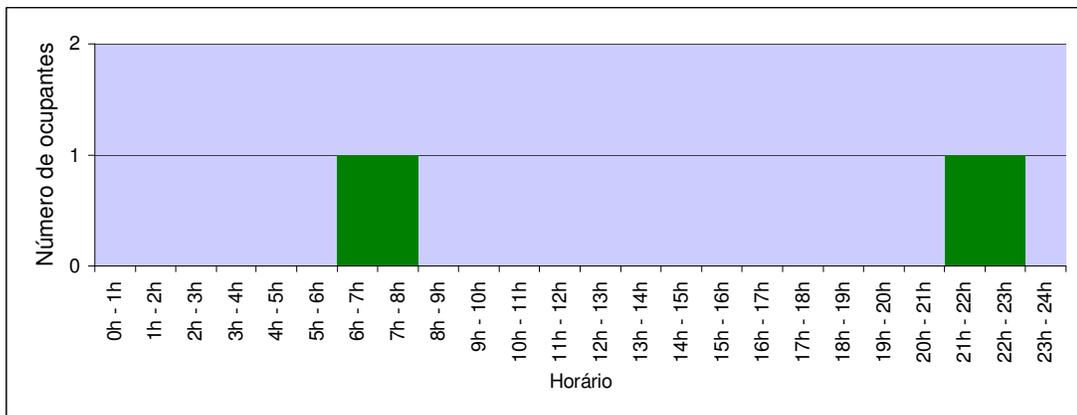


Figura C.3- Ocupação durante a semana da casa de banho [Número de ocupantes].

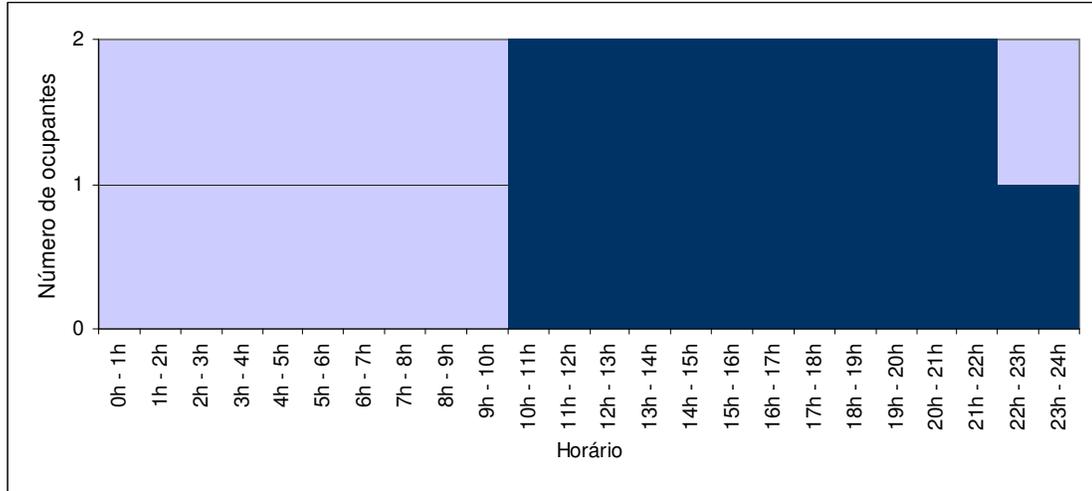


Figura C.4- Ocupação durante o fim-de-semana da cozinha/sala [Número de ocupantes].

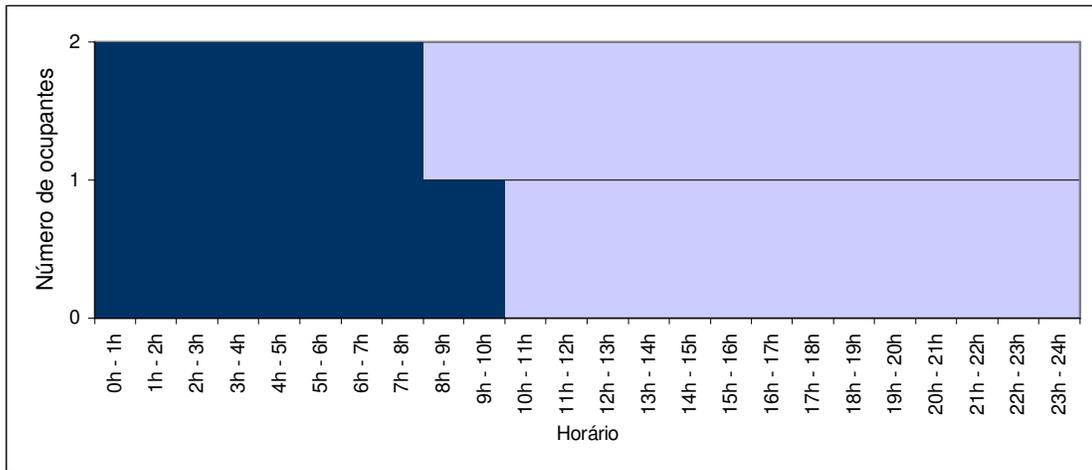


Figura C.5- Ocupação durante o fim-de-semana do quarto [Número de ocupantes].

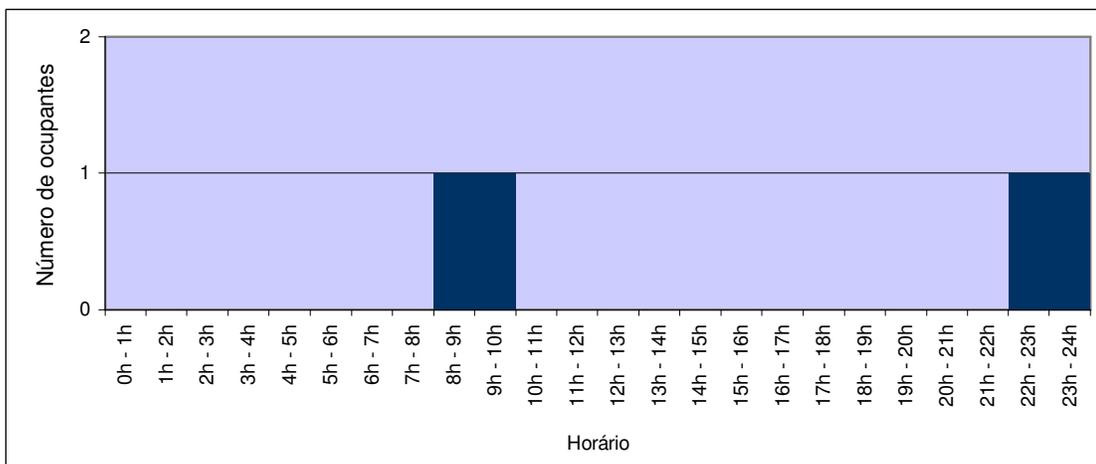


Figura C.6- Ocupação durante o fim-de-semana da casa de banho [Número de ocupante]

ANEXO D – Energia incorporada dos materiais

Os coeficientes de energia incorporada dos materiais, utilizados no cálculo da energia incorporada, foram obtidos na base de dados do software GaBi (onde se atribui 82,6 MJ/kg para o EPS, 85 MJ/kg para o XPS e 14 MJ/kg para a lã de rocha).

Para o cálculo da energia dispendida durante o transporte dos materiais foi considerado o camião como meio de transporte e uma distância média até ao local da obra de 20 km.

As quantidades de materiais utilizadas no cálculo da energia incorporada são as indicadas no quadro seguinte (Quadro D.1).

Quadro D.1- Quantidades de materiais utilizadas para o cálculo da energia incorporada.

Materiais	Análise base [kg]	Caso 4 [kg]	Caso 5 [kg]	Caso 6 [kg]	Caso 7 [kg]
Gravilha	3075,31	3075,31	3075,31	3075,31	3075,31
XPS	148,85	148,85	130,24	120,94	111,64
Tela asfáltica	558,18	558,18	558,18	558,18	558,18
OSB	579,15	579,15	579,15	579,15	579,15
Lã de rocha	129,54	108,15	86,77	76,08	65,38
Gesso cartonado	894,24	894,24	894,24	894,24	894,24
Reboco	328,23	328,23	328,23	328,23	328,23
EPS	28,13	28,13	28,13	28,13	28,13
Soalho de madeira	345,54	345,54	345,54	345,54	345,54
Camada de betão	5316,00	5316,00	5316,00	5316,00	5316,00
Regularização	2790,90	2790,90	2790,90	2790,90	2790,90
Portas em madeira	101,87	101,87	101,87	101,87	101,87
Vidros	170,10	170,10	170,10	170,10	170,10
Estrutura metálica	2142,00	2142,00	2142,00	2142,00	2142,00
Legenda:					
	Alterações em relação à análise base				