

**AS POTENCIALIDADES DO CONCEITO PASSIVE HOUSE
PARA FAZER FACE ÀS EXIGÊNCIAS DE EDIFÍCIOS COM
NECESSIDADES ENERGÉTICAS QUASE NULAS**

Gustavo Henrique Kayser Vargas

Relatório Final de Projeto Apresentado à
Escola Superior de Tecnologia e Gestão
Instituto Politécnico de Bragança

Para a Obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia da Construção

Junho 2019

**AS POTENCIALIDADES DO CONCEITO PASSIVE HOUSE PARA
FAZER FACE ÀS EXIGÊNCIAS DE EDIFÍCIOS COM NECESSIDADES
ENERGÉTICAS QUASE NULAS**

Gustavo Henrique Kayser Vargas

Relatório Final de Projeto Apresentado à
Escola Superior de Tecnologia e Gestão
Instituto Politécnico de Bragança

Para a Obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia da Construção
No âmbito da dupla diplomação com
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Orientadora: Prof.^a Especialista Sílvia Maria Afonso Fernandes
Coorientador: Prof.^o Doutor Arthur Medeiros

Junho 2019

*“Acho que nada acontece por acaso, sabe?
Que no fundo as coisas têm seu plano secreto,
embora nós não entendamos.”*

- Carlos Ruiz Zafon

AGRADECIMENTOS

Ao Instituto Politécnico de Bragança, que possibilitou o desenvolvimento desta dissertação e que proporcionou incríveis experiências.

À Universidade Tecnológica Federal do Paraná, instituição que tornou possível esse caminho pelo qual estou trilhando.

Ao Professor Arthur Medeiros, um grande professor e amigo, por estar sempre disposto a ajudar seus alunos.

À Professora Silvia Fernandes, por me orientar mesmo durante todas as dificuldades.

À minha querida família, que mesmo tão longe sempre acreditou em mim e me deu apoio.

À minha Lya, por sempre estar comigo em todas as situações, por mais difíceis que elas sejam.

RESUMO

A emissão de poluentes na atmosfera tem abordado com frequência as discussões científicas nos últimos anos. No que tange o setor da Construção Civil, o parque energético habitacional tem sido responsável por uma parcela significativa na emissão desses poluentes, em especial o CO₂. Buscando diminuir esse impacto, foram criadas legislações contendo planos de metas e imposições de limites térmicos e energéticos para as edificações.

Para este trabalho foram estudadas construções com o conceito *Passive House* para atender os critérios de edifícios com necessidades quase nulas de energia, obrigatórios para novos edifícios a partir de 2021. Esse tipo de solução apresenta tratamento térmico intensivo na envolvente e nas pontes térmicas da habitação, propondo soluções passivas e equipamentos com eficiência elevada de funcionamento.

Como resultado, as soluções *Passive House* apresentam elevado desempenho térmico, pontes térmicas quase nulas e elevado conforto térmico para os habitantes. Em compensação, para obter a certificação e atender aos critérios do *Passivhaus Institut* é necessário um investimento elevado em comparação às soluções correntes apresentadas em Portugal.

A partir disso, foi estudada uma habitação com características comuns para as cidades do Porto e de Lisboa. Nesse edifício foram adotadas soluções *Passive House* e soluções correntes para fazer face às novas exigências do Regulamento de Desempenho Térmico dos Edifícios de Habitação. Foram propostos sistemas técnicos comuns em Portugal para aquecimento, arrefecimento e preparação de águas quentes sanitárias. Assim, foram calculados os balanços energéticos e o retorno financeiro para cada uma das propostas apresentadas.

Como conclusão, observou-se que as soluções *Passive House* estudadas cumprem os requisitos como edifícios com necessidades energéticas quase nulas e que possuem elevada classificação energética. Porém, por apresentarem um alto custo de investimento inicial apresentam um tempo de retorno muito elevado comparados as soluções correntes em Portugal.

Palavras-chave: *passive house*, eficiência energética, habitação.

ABSTRACT

The emission of pollutants into the atmosphere has often addressed scientific discussions in recent years. Regarding the Civil Construction sector, the housing energy sector has been responsible for a significant portion of the emission of these pollutants, especially CO₂. Seeking to reduce this impact, legislation was created containing plans of goals and impositions of thermal and energetic limits for the buildings.

For this work were studied buildings with the Passive House concept to meet NZEB buildings criteria, mandatory for new buildings from 2021. This type of solution presents intensive thermal treatment in the envelope and the thermal bridges of the building, proposing passive solutions and equipment with high efficiency.

As a result, Passive House solutions feature high thermal performance, near-zero thermal bridges and high thermal comfort for residents. However, to obtain certification and meet the criteria of the Passivhaus Institut, the construction requires a high investment compared to the current solutions presented in Portugal.

From this, a resident building with common characteristics to the cities of Porto and Lisbon was studied. In this building were adopted Passive House solutions and current solutions to meet the new requirements of the Regulation of Thermal Performance of Resident Buildings. Common technical systems have been proposed in Portugal for heating, cooling and hot water preparation. Thus, energy balances and financial returns were calculated for each of the proposals presented.

As a conclusion, it was observed that the Passive House solutions studied fulfill the requirements as NZEB buildings and have high energy classification. However, because they present a high initial investment cost, they have a very high payback compared to current solutions in Portugal.

Keywords: *passive house*, energy efficiency, residential buildings.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
1.1 Objetivos	2
1.1.1 Objetivo Geral.....	2
1.1.2 Objetivos Específicos.....	2
1.2 Conteúdo e estrutura da tese	3
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	4
2.1 Desenvolvimento sustentável na construção .. Erro! Indicador não definido.	
2.2 Eficiência Energética em Edifícios.....	5
2.3 Enquadramento legislativo em Portugal do Desempenho Energético de Edifícios.....	6
2.3.1 Zonas Climáticas em Portugal	6
2.3.2 Certificação Energética de Edifícios	8
2.3.3 Critérios do Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Habitação.....	9
2.4 Edifícios com necessidades energéticas quase nulas.....	11
2.5 Casas Passivas.....	12
2.5.1 História.....	12
2.5.2 Conceito.....	13
2.6 <i>Passivhaus Institut</i>	14
2.7 Critérios técnicos para uma <i>Passive House</i>	14
2.8 Princípios básicos para uma <i>Passive House</i>	15
2.8.1 Isolamento térmico.....	15
2.8.2 Janelas	16
2.8.3 Sistema de ventilação com recuperador de calor	16
2.8.4 Estanqueidade ao ar.....	18
2.8.5 Tratamento das pontes térmicas.....	18
2.9 <i>Passive-On Project</i>	19
2.10 <i>Passive Houses in South West Europe</i>	21
2.11 Associação <i>Passivhaus</i> Portugal	22
2.12 Certificação <i>Passivhaus</i>	25
2.13 <i>Passive House Planning Package (PHPP)</i>	26
2.14 <i>Blower Door Test</i>	26
2.15 Sistemas técnicos para climatização e preparação de AQS	28

2.15.1	Caldeira a gás.....	28
2.15.2	Caldeiras de biomassa	29
2.15.3	Salamandra.....	29
2.15.4	Bomba de calor ar-água	29
2.15.5	Ar condicionado	30
2.16	Soluções construtivas para paredes opacas	30
2.16.1	Sistema ETICS	30
2.16.2	Sistema de fachadas para <i>Passive House</i>	31
3	METODOLOGIA	33
3.1	Descrição do edifício	33
3.2	Coeficiente de redução de perdas.....	36
3.3	Coeficientes de transmissão térmica para elementos opacos.....	37
3.4	Elementos envidraçados	38
3.5	Pontes térmicas lineares	38
3.6	Inércia térmica	39
3.7	Soluções construtivas.....	39
3.8	Sistemas técnicos.....	40
3.9	Cálculo das necessidades energéticas	40
3.10	Cálculos PHPP	41
3.11	Análise Financeira.....	42
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	44
4.1	Cálculo B_{tr}	44
4.1.1	Traçados da envolvente.....	46
4.2	Cálculo coeficiente de transmissão térmica elementos opacos	49
4.2.1	Solução segundo regulamentação portuguesa.....	49
4.2.2	Solução <i>Passive House</i>	51
4.3	Elementos envidraçados	55
4.4	Sistemas de ventilação.....	55
4.5	Pontes térmicas lineares	56
4.6	Sistemas técnicos REH	57
4.6.1	Coletores solares	57
4.6.2	Combinação de sistemas técnicos.....	57
4.7	Sistemas técnicos solução <i>Passive House</i>	58
4.8	Balanço energético.....	59
4.8.1	Soluções segundo regulamentação portuguesa	59

4.8.2	Soluções <i>Passive House</i>	60
4.9	Cálculo PHPP.....	62
4.10	Análise financeira	63
4.10.1	Fatura Energética	63
4.10.2	Custos de investimento.....	63
4.10.3	Tempo de retorno	65
5	CONCLUSÃO	67
5.1	Trabalhos futuros.....	68
6	REFERÊNCIAS	69

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Critérios para definição da Classe Energética para edifícios de habitação. Fonte: Despacho nº 15793-J/2013.	8
Tabela 2 - Coeficientes de transmissão térmica superficiais máximos admissíveis de elementos opacos. Fonte: Portaria 379-A.	11
Tabela 3 – Coeficientes de transmissão térmica para Passive Houses em Porto e Lisboa. Fonte: Schnieders (2009).....	21
Tabela 4 - Classes de inércia térmica interior. Fonte: Despacho n.º 15793-K/2013..	39
Tabela 5 - Levantamento dimensional dos espaços úteis da habitação.....	44
Tabela 6 - Cálculo de A_i para espaços não úteis.	45
Tabela 7 - Cálculo de A_u para espaços não úteis.	45
Tabela 8 - Definição do coeficiente de perdas para os espaços não úteis.....	45
Tabela 9 - Descrição da solução proposta para elementos opacos da envolvente térmica, segundo exigências do REH.....	50
Tabela 10 - Solução descritiva proposta para as pontes térmicas planas do edifício, segundo exigências do REH.	51
Tabela 11 - Descrição da solução proposta para elementos opacos da envolvente térmica, segundo exigências do REH e do PHI para a região do Porto.	52
Tabela 12 - Descrição da solução proposta para elementos opacos da envolvente térmica, segundo exigências do REH e do PHI para a região de Lisboa.	53
Tabela 13 - Solução descritiva proposta para as pontes térmicas planas do edifício, segundo exigências do REH e do PHI para a região do Porto.	54
Tabela 14 - Solução descritiva proposta para as pontes térmicas planas do edifício, segundo exigências do REH e do PHI para a região de Lisboa.	54
Tabela 15 - Dados relativos à solução proposta para vidros duplos segundo as exigências do REH.	55
Tabela 16 - Discriminação das pontes térmicas lineares, segundo exigências do REH.....	56
Tabela 17 - Sistemas técnicos avaliados.	58
Tabela 18 - Combinações dos sistemas técnicos.....	58
Tabela 19 - Necessidades energéticas para a cidade do Porto para cada solução proposta.....	59

Tabela 20 - Necessidades energéticas para a cidade de Lisboa para cada solução proposta.....	60
Tabela 21 - Identificação das Soluções Passive House.	61
Tabela 22 - Necessidades energéticas para a cidade do Porto para cada solução proposta.....	61
Tabela 23 - Fatura energética anual climatização e preparação de AQS para as soluções que seguem unicamente a regulamentação portuguesa.....	63
Tabela 24 - Fatura Energética para as soluções Passive House.	63
Tabela 25 - Custo de investimento para as soluções que atendem as exigências do REH.....	64
Tabela 26 - Custos relativos às soluções Passive House.	64
Tabela 27 - Custo de investimento total para as soluções.	65
Tabela 28 - Cálculo do Payback para as soluções apresentadas para a cidade do Porto.....	65
Tabela 29 - Cálculo do Payback para as soluções apresentadas para a cidade de Lisboa.....	66

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 – Emissão de CO2 por setor em Portugal. Fonte: DCLIMA (2014).	4
Figura 2 - Zonas Climáticas de Inverno em Portugal. Fonte: Despacho nº 15793-F/2013.	7
Figura 3 - Zonas Climáticas de Verão em Portugal Continental. Fonte: Despacho nº 15793-F/2013.	7
Figura 4 - Exemplo de ventilação mecânica. Fonte: ADENE (2016).	17
Figura 5 – Balanço energético obtido pelo PHPP para a Primeira Passive House em Portugal. Fonte: PHPT (2013).	23
Figura 6 – Solução inicial e solução final de paredes exteriores da habitação. Fonte: Marcelino (2012).	23
Figura 7 – Solução inicial e solução final para o telhado da habitação. Fonte: Marcelino (2012).	24
Figura 8 – Solução inicial e final para os envidraçados da habitação. Fonte:(Marcelino (2012).	24
Figura 9 – Esquema do equipamento necessário para a realização do Blower door test. Fonte: PHPT (2018).	27
Figura 10 - Esquema de funcionamento de caldeira condensação a gás e de caldeira de condensação a gás. Fonte: ATD-RM (2015).	28
Figura 11 - Exemplificação do Sistema ETICS. Fonte: APFAC (2015).	31
Figura 12 - Componentes de sistema de fachada certificada pelo PHI. Fonte: Knauf (2019)	32
Figura 13 - Planta baixa da cave à esquerda e planta baixa do rés-de-chão à direita.	34
Figura 14 - Planta baixa do 1º piso à esquerda e planta baixa do sótão à direita.	35
Figura 15 - Elevação principal à esquerda e elevação posterior à direita.	35
Figura 16 - Cortes AA' e BB' do edifício.	36
Figura 17 - Corte CC'	36
Figura 18 - À esquerda o traçado das paredes da envolvente na cave e à direita o traçado das paredes da envolvente no rés-de-chão.	46
Figura 19 - À esquerda o traçado das paredes da envolvente no primeiro piso e à direita o traçado das paredes da envolvente no sótão.	47

Figura 20 - À esquerda o traçado dos pavimentos da envolvente na cave e à direita o traçado dos pavimentos da envolvente no rés-de-chão.	47
Figura 21 - À esquerda o traçado dos pavimentos da envolvente no primeiro piso e à direita o traçado dos pavimentos da envolvente no sótão	48
Figura 22 - À esquerda o traçado das coberturas da envolvente na cave e à direita o traçado das coberturas da envolvente no rés-de-chão.....	48
Figura 23 - À esquerda o traçado das coberturas da envolvente no primeiro piso e à direita o traçado das coberturas da envolvente no sótão.	49
Figura 24 - Resultados fornecidos pelo PHPP para a Solução Passive House na Região do Porto.....	62
Figura 25 - Resultados fornecidos pelo PHPP para a Solução Passive House na Região de Lisboa.....	62

ÍNDICE DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ADENE	Agência para a Energia
AQS	Águas Quentes Sanitárias
cm	Centímetro
EN	Norma Europeia
EPS	Poliestireno Expandido
K	Kelvin
kg	Kilograma
m	Metro
NZEB	<i>Nearly Zero Energy Building</i>
°C	<i>Graus Celsius</i>
PHI	<i>Passivhaus Institut</i>
PHPP	<i>Passive House Planning Package</i>
PHPT	<i>Passivhaus Portugal</i>
RECS	Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Comércio e Serviços
REH	Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Habitação
SCE	Sistema de Certificação Energética
UE	União Europeia
W	Watts
XPS	Poliestireno Extrudido

1. INTRODUÇÃO

Devido às várias pesquisas a respeito do aquecimento global e os indicativos preocupantes relacionados, o tema sustentabilidade vem sendo constantemente discutido nos mais diversos meios de informação e comunicação. Sabendo dos riscos ambientais envolvidos e procurando conscientizar sobre melhorar a forma de interação com a natureza, países e organizações vêm investindo nessa área.

A eficiência energética dos edifícios está diretamente ligada à sustentabilidade e vem ganhando espaço dentro do setor da Construção. Segundo IEA (2014), políticas fortes e influentes em relação à eficiência energética, além de gerar a redução do consumo de energia, podem reduzir as alterações climáticas e a poluição local do ar.

Uma das soluções encontradas é a certificação energética de edifícios que muitos países já adotaram ou estão adotando. Em Portugal, existe atualmente o Sistema de Certificação Energética que estabelece classes energéticas de acordo com a razão entre as necessidades anuais de energia e as necessidades máximas calculadas.

A Diretiva 2010/31/UE estabeleceu metas para a redução de consumo de energia em edifícios. A partir desta, cada país-membro da União Europeia criou sua própria legislação. Em Portugal, foram criados o Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Habitação (REH) e o Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Comércio e Serviços (RECS). A intenção é que os novos edifícios possuam necessidades quase nulas de energia após 31 de dezembro de 2020.

Para alcançar esse objetivo o Setor da Construção passou a adotar mais soluções na envolvente dos edifícios, de tal modo que diminuíssem as necessidades de energia para aquecimento e arrefecimento. Houve também uma evolução nos sistemas técnicos e no uso de energias renováveis, buscando tornar os novos edifícios cada vez menos dependentes do consumo de energia primária.

Uma solução corrente que vem sendo utilizada em alguns países é a construção de *Passive Houses* ou Casa Passivas que se destacam pelo baixo consumo de energia e elevado grau de conforto térmico para o usuário. O

instituto alemão *Passivhaus* (PHI), um dos percursores na construção desse tipo de habitação, possui uma legislação rígida que aborda principalmente critérios para as envolventes dos edifícios.

O PHI propõe a utilização sistemas passivos na habitação, de forma a manter um nível elevado de qualidade térmica interior. Os poucos sistemas ativos necessários possuem uma baixa necessidade energética que é suprida pelo uso de energias renováveis.

1.1 Objetivos

O presente trabalho possui objetivos gerais e específicos apresentados a seguir:

1.1.1 Objetivo Geral

Comparar o desempenho energético de uma edifício novo de habitação, unifamiliar, utilizando os requisitos do Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Habitação, tendo em consideração a Portaria n.º 98/2019 relativa à edifícios com necessidades quase nulas de energia, com os requisitos *Passive House*.

1.1.2 Objetivos Específicos

Visando a realização do objetivo geral, os seguintes objetivos específicos serão realizados:

- Calcular o desempenho energético de uma solução corrente em Portugal que atenda à Legislação Portuguesa sobre o Desempenho Energético de Edifícios, tendo já em conta a Portaria n.º 98/2019 referente às edifícios com necessidades quase nulas de energia, em um edifício padrão para as cidades de Porto e Lisboa;
- Calcular o desempenho energético de uma *Passive House* em um edifício padrão para as cidades de Porto e Lisboa;
- Comparar a viabilidade econômica das diferentes soluções construtivas apresentadas.

1.2 Conteúdo e estrutura da tese

Além desta seção introdutória, este trabalho está dividido em mais quatro capítulos: Revisão Bibliográfica, Metodologia, Resultados e Discussões e Conclusão e Trabalhos Futuros.

O Capítulo 2 busca levantar informações sobre o Regulamento de Desempenho Energéticos dos Edifícios de Habitação e das exigências do *Passivhauss Institut* para certificação de casas passivas. Além disso, apresentam-se materiais, técnicas e equipamento para o caso de estudo.

No Capítulo 3 estão detalhadas as etapas para o desenvolvimento do caso de estudo. Estão apresentadas Normas, equações e *softwares* para a realização dos projetos térmicos.

Seguindo a metodologia proposta no capítulo anterior, o Capítulo 4 dedica-se à exposição e discussão dos resultados obtidos. É apresentada um detalhamento das soluções construtivas do caso de estudo, comparando os balanços energéticos e os tempos de retorno de investimento em relação à solução inicial.

Por fim, no Capítulo 5 são apresentadas as conclusões a respeito do trabalho e de todos os resultados obtidos, além de sugerir possíveis trabalhos futuros.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo será apresentada a revisão bibliográfica norteadora deste estudo, no qual é importante compreender os aspectos relacionados ao tema abordado neste trabalho.

2.1 Desenvolvimento sustentável na construção

Segundo Brundtland (1987), o conceito de desenvolvimento sustentável pode ser entendido como “o desenvolvimento que satisfaz as necessidades atuais sem comprometer a capacidade das gerações futuras para satisfazerem as suas próprias necessidades”.

Para Sachs (1993), quando o uso de recursos potenciais é intensificado a sustentabilidade ambiental se torna possível. O uso desses recursos deve ser utilizado em causas que apresentem propósitos socialmente válidos. Dessa forma, busca-se reduzir, por exemplo o uso e a exploração de combustíveis fósseis.

Segundo o site oficial do Parlamento Europeu (2018), o setor de energia foi responsável por 78% da emissão de gases estufas na União Europeia. Em Portugal, o setor energético foi responsável em 2012 por 70% das emissões de CO₂, sendo que o setor energético residencial e de serviços foi responsável por 7% do total (DCLIMA, 2014).

A emissão de CO₂ dividida por setor em Portugal é mostrada na Figura 1.

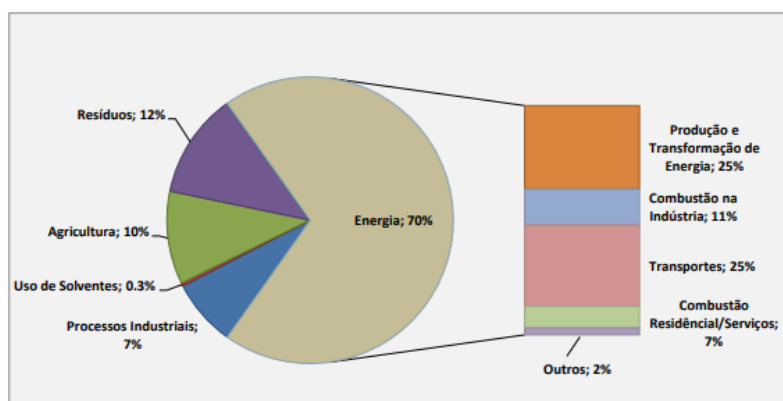


Figura 1 – Emissão de CO₂ por setor em Portugal. Fonte: DCLIMA (2014).

A construção de prédios sustentáveis reflete também formas para diminuir os gastos energéticos do setor, principalmente os ligados ao aquecimento e ao arrefecimento. É preciso que haja uma troca do tipo de consumo energético, trocando energias poluentes pelo uso de energias renováveis, produzidas no próprio local ou nas proximidades.

2.2 Eficiência Energética em Edifícios

Segundo a Conferência das Nações Unidas sobre o Meio Ambiente e Desenvolvimento (1995), o “desenvolvimento, eficiência e consumo de energia” foi um dos três itens apresentados para a promoção do desenvolvimento sustentável.

De acordo com Lausten (2008), no biênio 2004-05, o setor residencial foi responsável por 27,1% do consumo total de energia no planeta, sendo superado apenas pelo setor industrial (29,0%) e pelo setor de transportes (30,3%). O setor comercial é responsável por 8,8% do consumo global de energia, sendo assim o setor comercial e o residencial juntos são os principais consumidores de energia do planeta.

Em Portugal, o setor doméstico foi responsável em 2016 por 16,7% pelo consumo total de energia do país. Houve uma queda de 2% no consumo doméstico total entre 2007 e 2017, embora o setor tenha se mantido proporcionalmente estável na faixa dos 17% do consumo total de energia (DGEG, 2018).

Lausten (2008) diz ainda que a eficiência energética de uma edificação nova influencia por mais tempo o consumo energético do seu setor do que elementos novos em seus próprios setores. Isso se deve ao fato de uma edificação possuir um período de utilização e de vida útil mais alto, existindo alguns casos em que a utilização pode ultrapassar algumas centenas de anos.

2.3 Enquadramento legislativo em Portugal do Desempenho Energético de Edifícios

A legislação atual portuguesa referente ao desempenho térmico de edifícios foi elaborada a partir da Diretiva 2010/31/EU relativa ao desempenho energético dos edifícios e a Diretiva 2012/27/EU sobre a eficiência energética. Entretanto, a Diretiva 2018/844/EU, datada de 30 de maio de 2018, que vem alterar essas Diretivas, não foi enquadrada pela legislação portuguesa até a data de apresentação deste trabalho.

A nova Diretiva surgiu para intensificar as ações para o desenvolvimento de um sistema energético sustentável. A meta é a redução da emissão de gases com efeito de estufa em pelo menos 40% até o ano de 2030, assim como, aumentar o consumo de energias renováveis, a poupança de energia, a segurança energética europeia, a competitividade e a sustentabilidade.

O Decreto-Lei n.º 118/2013, de 20 de agosto, foi publicado para atender as exigências da Diretiva 2010/31/EU e melhorar o desempenho térmico de edifícios no país. O decreto-Lei aprovou o Sistema de Certificação Energética de Edifícios, o Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Habitação e o Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Comércio e Serviços. O Decreto-Lei n.º 118/2013 sofreu, entretanto, algumas alterações correspondendo a última ao Decreto-Lei n.º 194/2015, de 14 de setembro.

A partir desses decretos-lei, foram criados despachos e portarias para a determinação dos parâmetros térmicos necessários e outros elementos para assegurar o cumprimento dos regulamentos aprovados. As exigências relativas ao requisitos da envolvente têm vindo a aumentar ao longo das atualizações.

2.3.1 Zonas Climáticas em Portugal

Zonas Climáticas são representações gráficas em mapas que apontam semelhanças climáticas em determinadas regiões. As características climáticas são influenciadas pela posição relativa no globo terrestre, a altitude, a localidade em relação ao mar e outros fatores.

Em Portugal, o primeiro instrumento legal que definia as zonas climáticas do país como requisito para a construção e remodelação de edifícios existentes,

de modo que atendessem condições de conforto térmico, foi o Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios. O documento foi aprovado pelo Decreto-Lei n.º 40/90, de 6 de fevereiro.

A legislação mais recente sobre Zonas Climáticas em Portugal é o Despacho nº 15793-F/2013, que divide o país em três zonas climáticas de verão, sendo a zona V3 a mais rigorosa, e em três zonas climáticas de inverno, sendo I3 a mais rigorosa. Existem, portanto, nove combinações possíveis de zonas climáticas de inverno e de verão. Nas Figura 2 e 3, é possível ver a representação gráfica de cada uma dessas zonas.

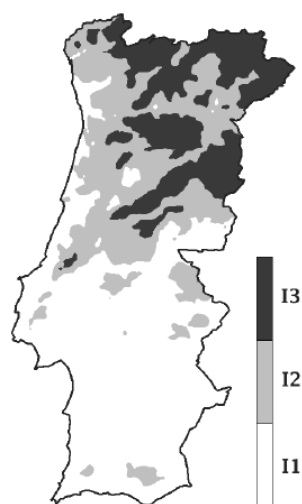


Figura 2 - Zonas Climáticas de Inverno em Portugal. Fonte: Despacho nº 15793-F/2013.

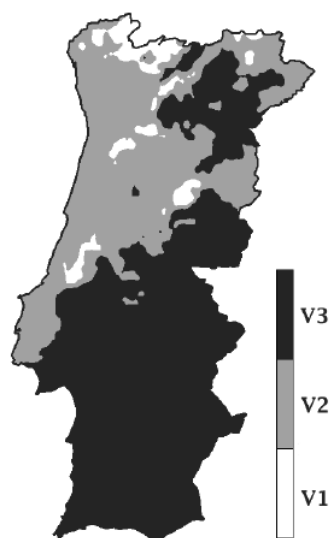


Figura 3 - Zonas Climáticas de Verão em Portugal Continental. Fonte: Despacho nº 15793-F/2013.

2.3.2 Certificação Energética de Edifícios

Em Portugal, desde 2009 a certificação energética é obrigatória tanto para novos edifícios quanto para edifícios existentes. De acordo com o que já foi referido anteriormente, o atual Sistema de Certificação de Edifícios foi aprovado pelo Decreto-Lei n.º 118/2013. A certificação é dividida em 8 classes, iniciando na classe F, a menos eficiente, até a classe A+, a mais eficiente, de acordo com a relação entre as necessidades anuais de energia primária e as necessidades anuais de referência. O intervalo da relação R_{Nt} para cada uma das 8 classes energéticas está apresentado na Tabela 1.

Tabela 1 - Critérios para definição da Classe Energética para edifícios de habitação. Fonte: Despacho nº 15793-J/2013.

Classe Energética	Valor de R_{Nt}
A+	$R_{Nt} \leq 0,25$
A	$0,26 \leq R_{Nt} \leq 0,50$
B	$0,51 \leq R_{Nt} \leq 0,75$
B-	$0,76 \leq R_{Nt} \leq 1,00$
C	$1,01 \leq R_{Nt} \leq 1,50$
D	$1,51 \leq R_{Nt} \leq 2,00$
E	$2,01 \leq R_{Nt} \leq 2,50$
F	$R_{Nt} \geq 2,51$

O Decreto estabelece que o Sistema de Certificação Energética de Edifícios (SCE) abrange os edifícios ou frações, novos ou sujeitos a grandes intervenções nos termos do REH e RECS e edifícios e frações já existentes a partir do momento de sua venda ou de sua locação. Segundo o Regulamento, um edifício novo é aquele em que o processo de licenciamento ou autorização de edificação tenha data de entrada junto das entidades competentes, a partir da data de entrada do projeto de arquitetura, posterior a 1 de dezembro de 2013. Caso contrário, o edifício será considerado como já existente ou sujeito a grande intervenção.

O documento de Certificação Energética apresenta as características da casa, como ventilação, isolamento das janelas, produção de águas quentes sanitárias e seu efeito no consumo de energia. Para os edifícios novos é obrigatória a emissão de um pré-certificado energético, emitido em fase de

projeto antes do início da construção. Após a conclusão da obra é preciso obter o certificado energético, sendo que a exigência mínima é estar dentro da Classe B- (ADENE, 2018).

A Direção-Geral de Energia e Geologia (DGEG) é que possui a competência para fiscalizar o SCE, enquanto a Agência para a Energia (ADENE) é a responsável por geri-lo. Para a certificação existem profissionais que trabalham de forma independente, mas que são reconhecidos pela ADENE. Estes exercem a atividade como Peritos Qualificados (PQ), mas existem também Técnicos de Instalação e Manutenção (TIM) de edifícios e sistemas técnicos.

Segundo ADENE (2019), site oficial do SCE, os PQ “são técnicos responsáveis pela avaliação energética de edifícios e respectiva emissão do Certificado Energético”. Entre as suas principais competências estão a emissão de pré-certificados e certificados energéticos do SCE e a colaboração nos processos de verificação de qualidade do SCE. Estes podem ser enquadrados em duas categorias profissionais, PQ-I e PQ-II, de acordo com o Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Habitação e o Regulamento Energético dos Edifícios de Comércio e Serviços, respectivamente.

2.4.3 Critérios do Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Habitação

O Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Habitação estabelece metodologias, requisitos e parâmetros para caracterizar o desempenho energético dos edifícios de habitação. As regras de determinação da classe da classe energética estão expostas no Despacho n.º 15793-J/2013, enquanto os requisitos de comportamento técnico e de eficiência de sistemas técnicos estão expostos na Portaria n.º 349-B/2013 que teve alguns de seus itens alterados posteriormente pelas Portarias n.º 379-A/2015, n.º 319/2016 e n.º 98/2019.

O REH privilegia a envolvente, aumentando cada vez mais as exigências em relação ao coeficiente de transmissão térmica U para obter edifícios com elevado desempenho energético. Em segundo e último plano, respectivamente, estão a melhora na eficiência de sistemas técnicos e a produção de energia. Relativamente à ventilação, a natural é claramente privilegiada em detrimento

dos equipamentos de ventilação mecânica, numa ótica de otimização de recursos, de eficiência energética e de redução de custos.

Os requisitos específicos para edifícios novos apresentados no REH podem ser resumidos da seguinte forma:

- Para o cálculo das necessidades de energia útil para aquecimento de um edifício, N_{ic} , deve ser utilizada uma temperatura interna de referência de 18°C;
- Para o cálculo das necessidades de energia útil para arrefecimento de um edifício, N_{vc} , deve ser utilizada uma temperatura interna de referência de 25°C;
- Os valores de N_{ic} , N_{vc} e N_{tc} correspondentes às soluções térmicas propostas para a habitação devem ser iguais ou inferiores aos valores limites N_i , N_v e N_t correspondentes aos parâmetros térmicos de referência para o mesmo edifício;
- Os requisitos anteriores devem ser cumpridos sem que sejam ultrapassados os valores-limite de qualidade térmica da envolvente estabelecidos na Portaria n.º 349-B/2013 e nas suas posteriores alterações. Os valores-limite englobam o valor máximo do coeficiente de transmissão térmica superficial dos elementos na envolvente opacas pontes térmicas plana e o valor máximo do fator solar dos vãos envidraçados horizontais e verticais;
- O valor da taxa de renovação horária nominal de ar deve ser igual ou superior a 0,4 renovações por hora;
- É obrigatória a instalação de sistemas solares térmicos para o aquecimento de águas sanitárias sempre que haja exposição solar adequada. Em alternativa podem ser considerados outros sistemas de aproveitamento de energias renováveis que, numa base anual, apresentem ganhos energéticos equivalentes ao sistema solar térmico. A contribuição de energia renovável calculada deve ser igual ou superior a um sistema idêntico baseado em coletores solares padrão, cujas características estão apresentadas na Portaria 349-B/2013;

- Existem ainda requisitos específicos referentes ao sistemas técnicos da habitação. São exigidos requisitos gerais e de eficiência, conforme apresentado na Portaria 349-B/2013.

Os valores máximos para os coeficientes de transmissão térmica para as cidades de Porto e Lisboa, segundo o REH, estão apresentado na Tabela 2.

Tabela 2 - Coeficientes de transmissão térmica superficiais máximos admissíveis de elementos opacos. Fonte: Portaria 379-A.

Zona corrente da envolvente		U _{máx} [W/(m ² .K)]
		I1
Em contacto com o exterior ou com espaços não úteis com coeficiente de perdas $b_{tr} > 0,7$	Elementos opacos verticais	0,50
	Elementos opacos horizontais	0,40
Em contacto com outros edifícios ou espaços não úteis com coeficiente de redução de perdas $b_{tr} \leq 0,7$	Elementos opacos verticais	2,00
	Elementos opacos horizontais	1,65
Vãos envidraçados (U _w)		2,80

A classe da caixilharia quanto à permeabilidade do ar, não sendo um requisito obrigatório, é um dos parâmetros que influencia no cálculo do desempenho energético.

2.4 Edifícios com necessidades energéticas quase nulas

NZEB é a sigla para *Nearly Zero Energy Building*, ou edifícios com necessidades energéticas quase nulas de energia. O Anexo I da Diretiva 2010/31/UE cita que o desempenho energético de um edifício é determinado através da energia total calculada ou que é efetivamente consumida para a sua utilização típica, que inclui, a energia utilizada para aquecimento, refrigeração, ventilação, água quente e iluminação.

A Diretiva 2010/31/UE define um edifício com necessidades quase nulas como aquele que possui “um desempenho energético muito elevado”. A Diretiva ainda cita que “as necessidades de energia quase nulas ou muito pequenas deverão ser cobertas em grande medida por energia proveniente de fontes

renováveis, incluindo energia proveniente de fontes renováveis produzida no local ou nas proximidades”. Entretanto, não é citado qual o raio máximo de distância para que uma fonte de energia renovável seja considerada dentro das proximidades de um edifício.

A Portaria nº 98/2019, legislação mais recente que altera a Portaria nº 349-B/2013, apresenta requisitos técnicos para que um edifício de habitação novo seja considerado com necessidades quase nulas de energia. A Portaria já é obrigatória para novos edifícios públicos e para os demais edifícios novos se tornará obrigatória a partir de 1 de janeiro de 2021. Segundo essa Portaria, a habitação para ser considerada NZEB deve atender aos seguintes critérios em relação às necessidades energéticas:

- O valor das necessidades nominais anuais de energia útil para aquecimento (N_{ic}) deve ser inferior ou igual a 75% do seu valor máximo (N_i);
- O valor das necessidades energéticas nominais de energia primária (N_{tc}) deve ser inferior ou igual a 50% do seu valor máximo (N_t);
- Para a zona climática I1, caso a relação N_{ic}/N_i seja inferior ou igual a 0,6 e o fator solar máximo ($g_{T,max}$) dos vãos envidraçados seja inferior ou igual a 0,15, considera-se que o edifício tem apenas necessidades de aquecimento efetivas pontuais, pelo que o valor de N_{ic} , no cálculo das necessidades nominais anuais de energia primária é nulo.

A Portaria também estabelece que os edifícios com necessidades quase nulas devem possuir sistemas de aproveitamento de fontes de energia renovável que supram pelo menos 50% das necessidades anuais de energia primária.

2.5 Casas Passivas

2.5.1 História

A partir dos anos 1970, face a crise energética mundial existente houve a criação de diversas estratégias para reduzir a demanda de energia dos edifícios. A princípio não houve uma tentativa de repensar o conceito do edifício como um

todo, mas um olhar mais direcionado para o uso de energias renováveis e na redução de perdas de energia em componentes já existentes (Feist, et al, 2005).

As primeiras tentativas de se alterar o modo como as edificações fossem construídas para reduzir a demanda de energia para aquecimento trouxeram alguns problemas. O primeiro foram os custos dessas mudanças que impactavam significativamente no custo final da construção. O outro problema, foi que ao envelopar a edificação e usar mais janelas herméticas as trocas de ar por infiltração foram reduzidas, diminuindo a qualidade do ar interior e aumentando a umidade relativa e determinados cômodos. Percebeu-se então a necessidade do uso de ventilação mecânica. A partir dessas experiências o conceito *Passive House* foi desenvolvido, cuja ideia é criar uma envolvente com alto desempenho térmico ao ponto de depender apenas de um sistema muito simples de aquecimento (Feist, et al, 2005).

2.5.2 Conceito

De acordo com Sartori (2007), uma casa passiva é “um tipo de edifício de baixa energia, cujo projeto está orientado para maximizar a orientação de tecnologias passivas, podendo eventualmente adotar alguma tecnologia solar”.

Badescu (2003) referem-se ao termo *passive house* ou casa passiva como “um padrão de construção”. Esse padrão deve assegurar uma temperatura interior que não necessite do sistema convencional de aquecimento ou arrefecimento. O autor ainda diz que uma casa passiva recebe esse nome porque o ganho de calor através da irradiação solar pelas janelas e o calor emitido por moradores e equipamentos já é suficiente para que a temperatura se mantenha confortável durante as estações frias.

Uma “*Passive House* é um edifício, no qual o conforto térmico (ISO 7730) pode ser fornecido somente pelo pós-aquecimento ou pós-resfriamento do fluxo de ar necessário para uma boa qualidade de ar interna (DIN 1946) – sem o uso de ar recirculado adicional” (Passipedia, 2019).

A partir das definições anteriores é possível definir uma *Passive House* como uma edificação com vidros e sistemas de caixilharia de elevado desempenho e cuja envolvente apresenta alto grau de isolamento, em que as pontes térmicas e as infiltrações de ar são tratadas de forma rigorosa.

2.6 *Passivhaus Institut*

O *Passivhaus Institut* ou *Passive House Institute* (PHI) é um instituto independente de pesquisa que foi fundado pelo Dr. Wolfgang Feist no ano de 1996. O instituto é dos responsáveis pela evolução da definição do conceito *Passive House* e surgiu a partir de um projeto piloto em Darmstadt na Alemanha em 1990 (Passive House Institute, 2019).

A *Passive House* em Darmstadt Kranichstein surgiu pelas mãos de uma equipe de pesquisadores, que participavam do “*Passive House Preparatory Research Project*” ou Projeto de Pesquisa Preparatória para uma Casa Passiva em tradução livre. A pesquisa englobava outros oito projetos de pesquisa, cujos resultados resultaram na primeira construção *Passive House*. Os resultados traziam entre outras coisas alternativas de desenhos arquitetônicos, melhoras no sistema de ventilação para recuperação de calor, novas caixilharias e persianas especialmente isoladas, novos detalhes de construção para tratamento das pontes térmicas e tecnologias de aquecimento solar e o conceito de recuperação de calor a partir de águas residuais foram desenvolvidas (Passipedia, 2019).

2.7 Critérios técnicos para uma *Passive House*

O *Passivhaus Institut* estabelece certos critérios técnicos para que um edifício possa obter a certificação como uma *Passive House*. Os requisitos para um edifício de habitação são:

- Aquecimento: as necessidades anuais devem ser menores que 15 kWh/m² ou as necessidades em pico devem ser menores que 10 W/m²;
- Arrefecimento: as necessidades anuais devem ser menores que 15 kWh/m² somadas as necessidades de desumidificação ou as necessidades em pico devem ser menores que 10W/m²;
- Energia primária: as necessidades anuais de energia primária não podem exceder 120 kWh/m² ou o fornecimento anual de energias renováveis não pode exceder 60kWh/m²;

- Estanqueidade ao ar: o valor de n50 obtido através do blower door test deve ser inferior a 0,6 rph (renovações por hora);
- Conforto térmico: a temperatura interior deve ficar entre 20 e 25 °C e em climas mais quentes e/ou durante os meses de verão, o excesso de temperatura não deve ocorrer mais que em 10% do tempo.

2.8 Princípios básicos para uma *Passive House*

O Instituto também possui cinco princípios que devem ser aplicados a uma *Passive House*:

- Adequados níveis de isolamento da envolvente do edifício;
- Janelas e portas certificadas pela Passivhaus;
- Sistema de ventilação com recuperação de calor;
- Estanqueidade ao ar da envolvente do edifício;
- Evitar pontes térmicas na envolvente do edifício.

2.8.1 Isolamento térmico

A envolvente do edifício é composta por todos os elementos da construção que separam seu interior do exterior. Quando bem isolada e estanque ao ar proporciona condições internas confortáveis aos utilizadores da habitação, independentemente das condições externas afetadas pelo clima local. A partir disso, pode-se considerar que um isolamento contínuo por toda a envolvente pode ser considerado o princípio mais importante para uma construção com elevada eficiência energética, uma vez que minimiza as perdas de calor (Passipedia, 2019).

A tendência durante os meses frios é que a temperatura interior se mantenha superior a temperatura exterior, proporcionando assim perdas de calor através da envolvente. Perdas de calor através de paredes externas e telhados podem representar mais de 70% das perdas totais de edifícios existentes. Durante os meses quentes ocorre o processo inverso, a temperatura exterior é

maior que a interior proporcionando o excesso de calor no ambiente (Passipedia, 2019).

Para diminuir as perdas de calor e melhorar o conforto térmico é essencial melhorar o isolamento térmico na envolvente. Por isso, os valores de U para paredes externas, lajes e coberturas são extremamente baixos para *Passive Houses*. Para o clima da Europa Central os valores de U variam entre 0,10 e 0,15 W/(m².K), podendo ser maiores ou menores para outros climas e regiões. Com isolamentos térmicos tão rigorosos são reduzidas as necessidades energéticas para aquecimento e arrefecimento da habitação compensando o investimento extra ao longo do tempo (Passipedia, 2019).

2.8.2 Janelas

As janelas são essenciais para garantir o conforto térmico interior da habitação. Em climas frios, se forem mal isoladas ocasionarão superfícies relativamente frias na fachada. Essa superfície fria pode causar gotas de ar frio e correntes de ar frio que são solucionados através de um sistema de aquecimento ativo perto das janelas. Um problema que pode ser evitado ao se isolar corretamente as janelas (Passipedia, 2019).

2.8.3 Sistema de ventilação com recuperador de calor

A ADENE (2016) define ventilação como a renovação do ar interior por ar exterior, de uma forma controlada e divide-a em três tipos: ventilação natural, mecânica e mista. A primeira promove a renovação de ar apenas por meios naturais que promovem a admissão de ar, como janelas e aberturas com grelhas, e extração de ar, como as chaminés. A ventilação mecânica é responsável por promover a renovação de ar ininterruptamente através de equipamentos, podendo insuflar e extrair o ar ou apenas extraí-lo. O sistema misto promove a entrada do ar através de ventilação natural e extração por meios mecânicos.

Para manter caudais de ar constantes e assegurar a boa qualidade do ar interior é comum o uso de sistemas mecânicos. Uma das soluções é usar um ventilador para extração de zonas úmidas e outro para insuflação do ar nas outras áreas úteis da habitação. Um esquema está mostrado na Figura 4.

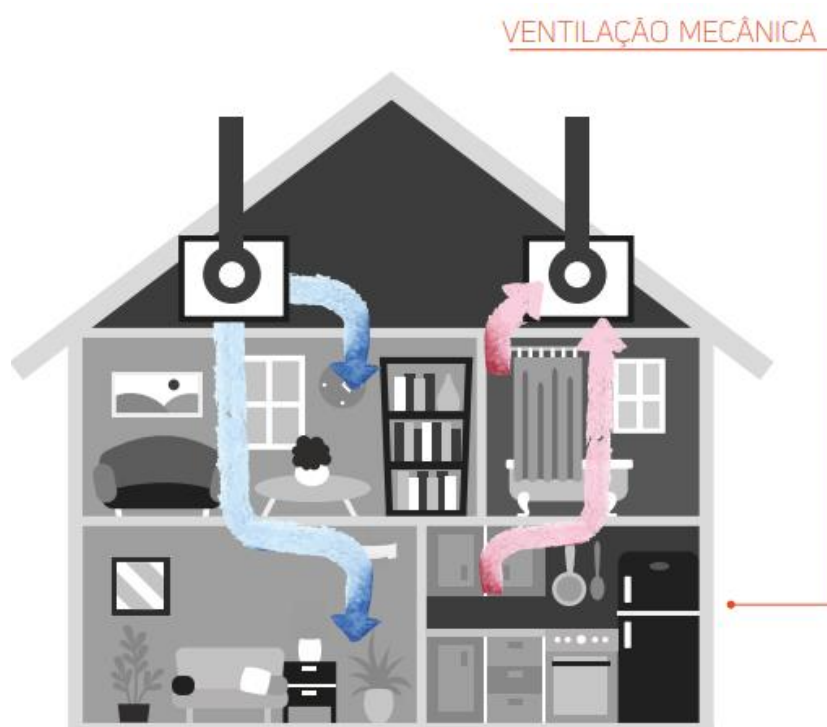


Figura 4 - Exemplo de ventilação mecânica. Fonte: ADENE (2016).

Como uma *Passive House* é muito bem isolada e estanque, a infiltração e a saída de ar são muito baixas, de tal forma que a renovação do ar não atenderia os requisitos da Qualidade do Ar Interior (QAI) sem o uso de ventilação mecânica. Acoplando um recuperador de calor a esse sistema de ventilação é possível distribuir calor pela habitação por meio do suprimento de ar. Um recuperador de calor com elevada eficiência é essencial para diminuir as perdas de ventilação e a demanda de calor garantindo o suprimento adequado de ar (Feist, et al, 2005).

Para o bom funcionamento do sistema de ventilação mecânica com recuperação de calor é necessário que o ar esteja sendo continuamente removido de cozinhas, banheiros e locais com alta concentração de umidade. Em compensação, o ar fresco exterior não utilizado deve suprir quartos, salas e quartos funcionais. A utilização correta das quantidades ideais de ar fresco suprido mantém uma qualidade higiênica do ar (Passipedia, 2019).

2.8.4 Estanqueidade ao ar

O ar interior apresenta uma umidade absoluta maior que o ar exterior, caso não sofra um processo de desumidificação. Em climas frios, durante o processo de exfiltração, o ar interno é resfriado e origina um processo de condensação em determinados locais da construção. Este processo pode ocasionar sérios danos. Em climas quentes e úmidos, quartos e outro cômodos ocupados são resfriados e o processo de infiltração ocasionará os mesmos problemas de umidade. Uma construção bem estanque, requisito para *Passive Houses*, é a melhor solução para esses casos (Passipedia, 2019).

O princípio fundamental para elaboração de uma construção estanque é o mesmo que o usado para o isolamento da envolvente, a linha de estanqueidade deve ser contínua sem possuir quebras. O projeto deve ser bem detalhado e deve especificar cada componente que formará a camada estanque e a sua posição relativa. É necessário também especificar como as extremidades das camadas estanques serão unidas de modo a manter a continuidade da estanqueidade. Por fim, devem ser planejadas as furações na camada estanque para passagem de tubulações e fiações. Caso sejam realmente necessárias o ideal é buscar concentrar a passagem dos elementos pelo menor número de furações possíveis (Passipedia, 2019).

2.8.5 Tratamento das pontes térmicas

Uma ponte térmica é uma região localizada na envolvente que apresenta menor resistência térmica do que seus elementos adjacentes. Dessa forma, ocorre um fluxo de calor maior na maioria dos casos por essas regiões devido a diferença de temperatura entre o interior e o exterior do edifício, aumentando assim as perdas de calor. Devido a isso, pode haver diferenças de temperatura nas superfícies interiores, podendo causar penetração de umidade e consequentemente o crescimento de fungos (Passipedia, 2019).

Em *Passive Houses* esses problemas são evitados, uma vez que as temperaturas das superfícies internas são tão altas e homogêneas que não é possível ocorrer níveis críticos de umidade. Se a habitação possuir perdas por

pontes térmicas inferiores ao valor limite de 0,01 W/(mK) o projeto pode ser considerado livre de pontes térmicas (Passipedia, 2019).

Para evitar as pontes térmicas é necessário que o projeto seja planejado de tal forma que seja possível traçar continuamente a espessura mínima do isolamento ao longo de toda a envolvente exterior. Assim, os pontos críticos podem ser facilmente identificados e tratados de maneira adequada a partir do detalhamento das conexões (Passipedia, 2019).

O conceito de pontes térmicas nulas só funciona perfeitamente utilizando dimensões exteriores. Hines (2015) citam alguns procedimentos que devem ser realizado para alcançar um projeto livre de pontes térmicas:

- Minimizar a complexidade do projeto – reduz a chance de erros e facilita o processo de construção;
- Entre as junções de elementos, as camadas de isolamentos não devem possuir lacunas;
- As camadas isolantes devem ser contínuas e sem interrupções;
- Projetar bordas e cantos para ter ângulos o mais obtusos possíveis;
- Durante a confecção do projeto deve-se assegurar que os detalhes estão dentro das tolerâncias adequadas de construção.

Hines (2015) citam também procedimentos que devem ser evitados ao se projetar uma habitação livre de pontes térmicas:

- Permitir interrupções na envolvente térmica. Caso seja inevitável, a resistência térmica do isolamento deve ser a mais alta possível;
- Subestimar as tolerâncias da construção.

2.9 *Passive-On Project*

O projeto *Passive-On* foi um importante estudo financiado pelo Programa IEE da Comissão Europeia que buscou analisar a aplicabilidade do conceito *Passive House* nos países do sul da Europa, como Portugal, Espanha e Itália. Esses países apresentam necessidades de aquecimento muito inferiores ao dos países nórdicos da Europa enquanto as necessidades de arrefecimento são significativamente maiores. O estudo levou em consideração o perfil econômico

e construtivo de cada país para apresentar propostas condizentes com a realidade de cada local (Passive-On, 2007).

Para Portugal foi avaliada uma casa localizada em Lisboa com dois quartos distribuídos por um único piso e que cumpria as exigências do regulamento de desempenho térmico que estava em vigor no ano de 2007, o RCCTE. O projeto apresentava uma área total útil de 110 m² e levou em consideração a relação com o sol, a ventilação para arrefecimento e a forte inércia térmica para controlar as variações de temperatura. O nível de isolamento era maior que o requerido pela regulamentação na época, mas esse não foi o principal foco do estudo (Passive-On, 2007).

A estratégia principal foi aproveitar os índices mais elevados de radiação solar através de sua captação. Por isso, cerca de 60% dos vãos envidraçados foram orientados a sul de forma a maximizar os ganhos diretos de radiação. Foram proposto vidros duplos com baixa emissividade por serem energeticamente eficientes em Portugal e economicamente mais viável. Para a captação solar foi utilizado um sistema solar térmico com os coletores orientados a sul (Passive-On).

Para evitar o sobreaquecimento durante a estação de arrefecimento, o projeto propôs utilizar um sistema de ventilação cruzada, de forma a libertar o calor armazenado nas paredes e no pavimento. Porém, ao contrário de *Passive Houses* em países nórdicos da Europa, foi proposto um sistema sem ventilação mecânica e que se baseava apenas na ventilação natural, principalmente durante a noite (Passive-On, 2007).

Foram propostos quatro modelos com diferentes combinações de isolamento. Os valores de U para a envolvente variavam de 0,12 a 0,39 W/(m².K) para a cobertura, de 0,13 a 0,41 W/(m².K) para o pavimento, de 0,18 a 0,52 W/(m².K) para paredes exteriores e de 2,01 a 2,53 W/(m².K) para paredes interiores. As paredes eram duplas, sendo no projeto o isolamento foi colocado no interiores devido ao padrão construtivo em Portugal na data do estudo (Passive-On, 2007).

Além da ventilação noturna, foi utilizado para arrefecimento um sistema de ar condicionado com unidades split espalhados pela sala de estar, pela cozinha e pelos quartos. Mesmo sendo desenhadas primordialmente para o arrefecimento, o projeto permitia que as unidades split pudessem auxiliar no

aquecimento. O sistema principal de aquecimento utilizava convectores hidráulicos para aproveitar a água quente do sistema solar (Passive-On, 2007).

2.10 Passive Houses in South West Europe

Além do *Passive-On*, outro importante estudo realizado foi o *Passive Houses in South West Europe*, apresentado por Jürgen Schnieders do PHI. Foram propostos modelos para a Itália, sul da França, Espanha e Portugal. Para os modelos desses países foram propostos níveis de isolamento menos rigorosos do que os recomendados para o norte da europeu (Schnieders, 2009).

As localizações escolhidas para estudo em Portugal foram as cidades de Porto e Lisboa. Para o modelo da primeira cidade foi proposto um nível de isolamento muito mais rigoroso do que para a segunda. Para Lisboa foi mantido o sistema de recuperação de calor através da ventilação, ao contrário da cidade do Porto, onde não foi utilizado. Para as duas situações foram definidos vidros duplos com baixa emissividade e caixilharia de alumínio com corte térmico (Schnieders, 2009). Os valores de U para os modelos das cidades de Porto e Lisboa estão apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 – Coeficientes de transmissão térmica para Passive Houses em Porto e Lisboa. Fonte: Schnieders (2009).

Solução construtiva	Lisboa	Porto
Paredes exteriores (U)	0,620 W/(m ² .K)	0,202 W/(m ² .K)
Cobertura (U)	0,330 W/(m ² .K)	0,155 W/(m ² .K)
Laje térrea (U)	0,850 W/(m ² .K)	0,432 W/(m ² .K)
Caixilharias de alumínio (U)	1,60 W/(m ² .K)	1,60 W/(m ² .K)
Vidro duplo (U; fator solar)	1,20 W/(m ² .K); 0,60	1,20 W/(m ² .K); 0,60

Os coeficientes de transmissão térmica apresentados na Tabela 3 são significativamente mais altos que os utilizados na Europa Central. Para esses países recomenda-se que os valores de U sejam menores que 0,15 W/(m².K) para paredes exteriores e menores que 0,8 W/(m².K) para vãos envidraçados (Feist, et al, 2005).

Com os níveis de isolamento definidos para o Porto, as necessidades de aquecimento para o modelo foram estimadas em 13,41 kWh/(m²a), mesmo sem

a utilização da recuperação de calor através da ventilação. Para o arrefecimento foi utilizada ventilação noturna através de janelas com abertura basculante suficiente, enquanto para Lisboa foi necessária a abertura total das janelas (Schnieders, 2009).

2.11 Associação *Passivhaus* Portugal

A Associação *Passivhaus* Portugal ou PHPT surgiu através da estratégia definida pelo *Passivhaus Institut* e pela Homegrid® (Empresa do setor da Construção localizada em Portugal) para implementar e expandir o conceito *Passive House* no país. O plano era construir a primeira casa passiva em Portugal que fosse certificada pelo instituto alemão e acompanhar o seu desempenho (PHPT, 2019).

No ano de 2012 foi inaugurada a primeira *Passive House* em Portugal. A construção fica localizada em Ílhavo e corresponde a duas habitações unifamiliares, sendo que uma delas contém componentes de eficiência hídrica e produção local de alimentos.

O projeto foi iniciado no ano de 2008 pela empresa Homegrid®, não tendo como objetivo inicial a certificação *Passive House*. A ideia era buscar um desempenho energético elevado, mas em 2011, quando a obra já havia sido iniciada, o projeto foi adaptado para se enquadrar nos requisitos exigidos pelo PHI (Homegrid, 2016).

Com base nessa adaptação foram implementadas outras soluções que estivessem de acordo com os princípios *Passive House*. Essas soluções focaram no isolamento térmico, na minimização das pontes térmicas, nas janelas, sombreamento, estanqueidade do ar e num sistema de ventilação com recuperação de calor (Homegrid, 2016).

O balanço energético de uma das moradias, calculado através do *Passive House Planning Package* (PHPP), está apresentado na Figura 5.

Specific building characteristics with reference to the treated floor area				Alternative criteria		Fullfilled? ²
Space heating	Treated floor area m ²	223,7				
	Heating demand kWh/(m ² a)	7	≤	15	-	yes
	Heating load W/m ²	9	≤	-	10	
Space cooling	Cooling & dehum. demand kWh/(m ² a)	-	≤	-	-	-
	Cooling load W/m ²	-	≤	-	-	-
	Frequency of overheating (> 25 °C) %	0	≤	10		yes
	Frequency excessively high humidity (> 12 g/kg) %	0	≤	20		yes
Airtightness	Pressurization test result n ₅₀ 1/h	0,5	≤	0,6		yes
Non-renewable Primary Energy (PE)	PE demand kWh/(m ² a)	43	≤	-		-
Primary Energy Renewable (PER)	PER demand kWh/(m ² a)	20	≤	60	60	yes
	Generation of renewable energy kWh/(m ² a)	27	≥	-	-	

² Empty field: Data missing; -: No requirement

Figura 5 – Balanço energético obtido pelo PHPP para a Primeira Passive House em Portugal. Fonte: PHPT (2013).

A Figura 6 mostra as alterações realizadas para atender as exigências de isolamento térmico. A solução inicial apresentava um coeficiente $U = 0,305$ W/(m².K) que foi reduzido para 0,262 W/(m².K). Esse valor é significativamente superior ao valor $U = 0,15$ W/(m².K) exigido pelo PHI na Alemanha (Marcelino, 2012).

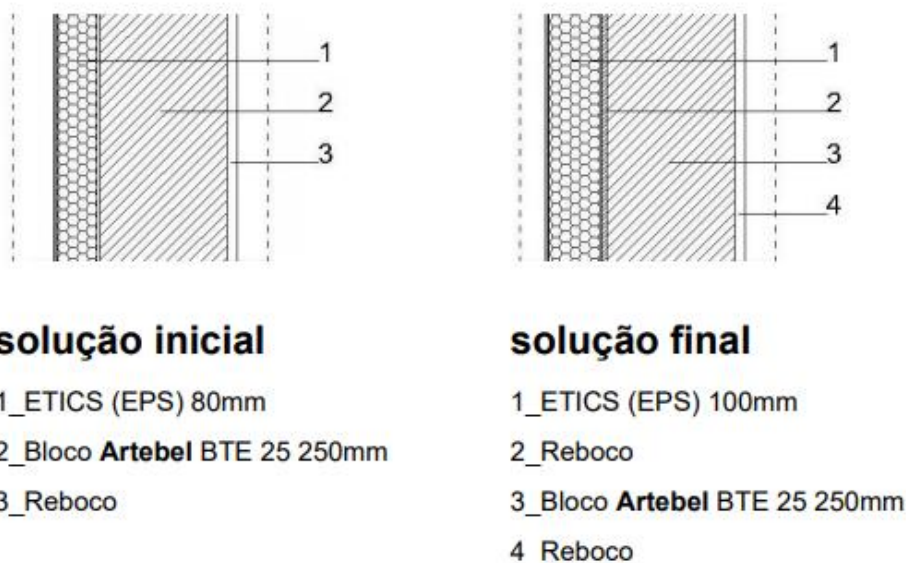


Figura 6 – Solução inicial e solução final de paredes exteriores da habitação. Fonte: Marcelino (2012).

Para a cobertura foi aumentado o valor do isolante XPS em 5 cm, provocando uma redução de $U = 0,333$ W/(m².K) para $U = 0,221$ W/(m².K). Também foram adotados outros procedimentos construtivos conforme a Figura 7.

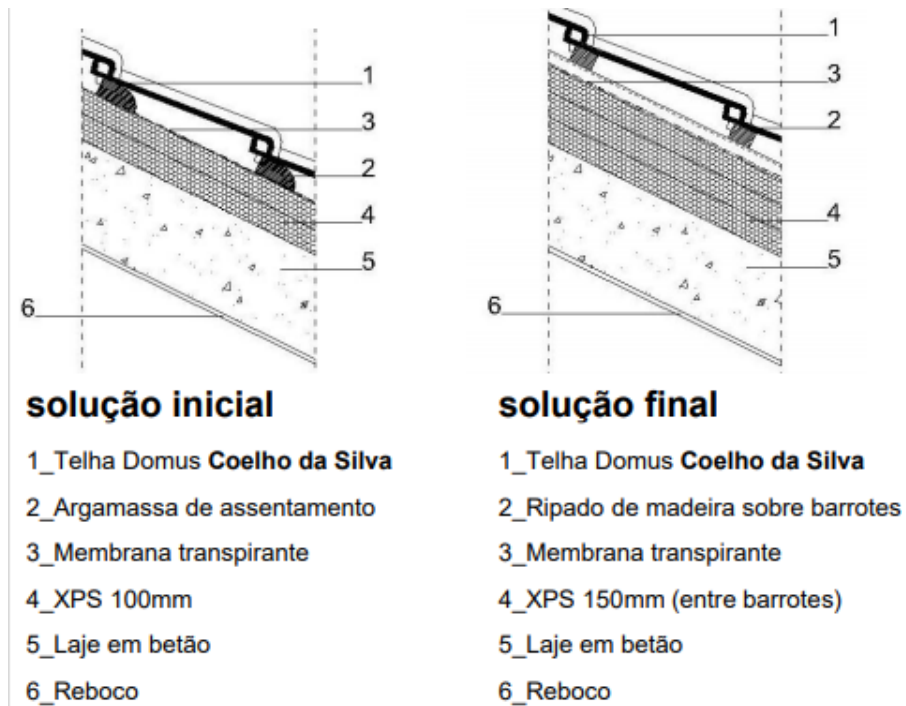


Figura 7 – Solução inicial e solução final para o telhado da habitação. Fonte: Marcelino (2012).

A solução adotada para os vãos envidraçados e as caixilharias está apresentado na Figura 8.

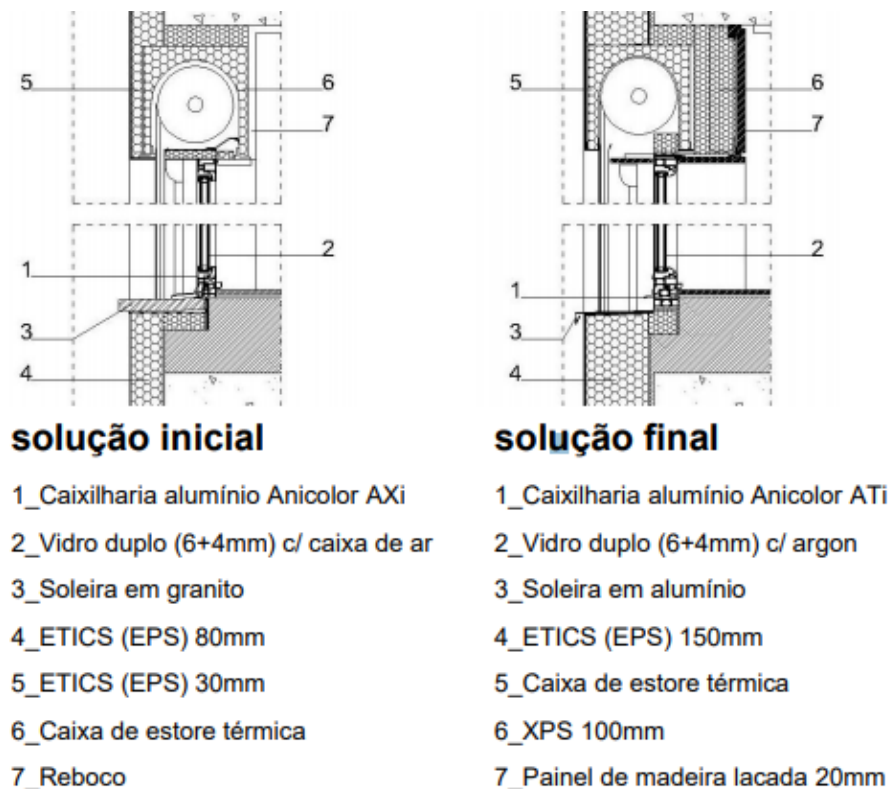


Figura 8 – Solução inicial e final para os envidraçados da habitação. Fonte:(Marcelino (2012).

Para os vãos envidraçados foram colocados mais isolantes térmicos visando eliminar as pontes térmicas e reduzir o coeficiente de transmissão térmica. Pela figura 8, é possível ver a camada de XPS que foi colocada para isolar a caixa de estore. Além disso, a soleira de granito que deveria ter sido usada segundo o projeto inicial foi substituída por uma em alumínio. O coeficiente projetado inicialmente estava no intervalo de $U = 2,45$ e $3,19$ $W/(m^2.K)$ que foi reduzido para o intervalo de $U = 1,53$ e $2,00$ $W/(m^2.K)$.

De acordo com o *Passive House Buildings* (2019), o *Blower Door Test* forneceu um valor $n_{50} = 0,54/h$. A demanda de aquecimento calculada foi de 11 $kWh/(m^2.ano)$ e a energia primária requerida calculada foi de 74 $kWh/(m^2.ano)$ para equipamentos de aquecimento, águas quentes sanitárias, eletricidade doméstica e energia auxiliar. O custo de construção foi de 1200 $€/m^2$, enquanto o custo da estrutura foi de 1000 $€/m^2$.

2.12 Certificação *Passivhaus*

Mesmo que um edifício tenha seguido todas as recomendações construtivas é aconselhável que seja certificado. Caso a edificação tenha cumprido todos os requisitos técnicos exigidos pela PHI pode obter o *Certified Passive House*. Esse certificado serve como garantia e de apoio comercial aos responsáveis pelo projeto, execução e venda do edifício. A obtenção do certificado pode ser feita tanto pelo PHI quanto por uma entidade credenciada.

Para edifícios já existentes e que foram sujeitos às obras de reabilitação é possível obter o EnerPHit. Como nem sempre é possível fazer muitas alterações em um edifício existente, transformá-la em uma edificação *Certified Passive House* pode ser tornar um processo muito complicado e caro. Para isso foi criado o EnerPHit que estabelece critérios menos rigorosos para obras de reabilitação.

Existem certificações que são emitidas às pessoas responsáveis pela elaboração de projetos de *Passive Houses*, o *Certified Passive House Designers*. O *Certified Passive House Tradesperson* é emitido para profissionais da construção após treinamento referentes às técnicas e habilidades para construção de uma *Passive House*. Essas certificações servem para comprovar

aos clientes que as pessoas responsáveis pela elaboração do edifício têm os conhecimentos e as competências necessárias para tal.

Por fim, existe uma certificação exclusiva aos componentes usados na construção, o *Certified Passive House Component*. O certificado assegura que se os componentes forem usados de forma correta e com bom planeamento ajudarão o edifício a obter uma certificação como *Passive House*. Vidros, caixilharias, portas, sistemas de ventilação e sistemas de fachadas são alguns exemplos de componentes sujeitos a essa certificação.

2.13 *Passive House Planning Package (PHPP)*

O PHPP foi desenvolvido em XLM pelo PHI para auxiliar o cálculo do balanço energético de edifícios. O programa verifica automaticamente se os critérios determinados pelo PHI estão sendo cumpridos, sendo, portanto, a ferramenta usada para avaliar se uma edificação pode ser certificada pelo instituto ou não.

A ferramenta tem caráter obrigatório para a certificação da habitação como uma *Passive House*. O PHPP é dividido em diversas abas nas quais podem ser inseridos os dados básicos da habitação e as soluções construtivas para a envolvente térmica do edifício. Além disso, são fornecidos diversas listagens dos componentes certificados pelo PHI e relatórios térmicos a partir de todas as soluções definidas pelo usuário.

2.14 *Blower Door Test*

O *Blower Door Test* é um teste padronizado pela ISO 9972:2015 para determinar a permeabilidade nas edificações ou de partes dela. Através de uma pressurização ou despressurização mecânica o teste descreve a medição das taxas de ar resultantes através das diferenças de pressão estática interior-exterior.

O teste não possui um limite máximo regulamentar em Portugal, mas, para efeitos de certificação energética, pode ser utilizado. Esse teste é essencial para identificar as zonas de infiltração na envolvente, permitindo apontar medidas de melhoria para a estanqueidade e para uma ventilação adequada. Além disso, é

obrigatório para que a edificação receba a certificação *Passive House*. O PHI pede que o valor da taxa de renovação de ar por hora à uma pressão de 50 Pa (n_{50}) seja menor ou inferior que 0,6 (PHPT, 2018).

O teste é realizado *in situ* após a conclusão da obra e utiliza um ventilador potente em uma estrutura montada em uma porta externa. Esse ventilador puxa o ar do interior para o exterior da casa, diminuindo assim a pressão do ar no interior. Dessa forma, o ar exterior flui para o interior através de fissuras ou entradas não seladas. Os principais pontos de infiltrações podem ser detectados através do uso de fumaça, aparelhos termográficos e até mesmo por inspeções visuais e auditivas (Energy Saver, 2019).

A estrutura flexível é instalada na porta através de suportes metálicos que podem ser regulados para melhor fixação. Na estrutura é montado um ventilador de velocidade variável acoplado a um sistema que permite medir as diferenças de pressão e o fluxo de ar. Todos os dados são armazenados diretamente em um software específico para o ensaio (Energy Saver, 2019).

Os equipamentos utilizados para a realização do ensaio estão apresentados na figura 9.

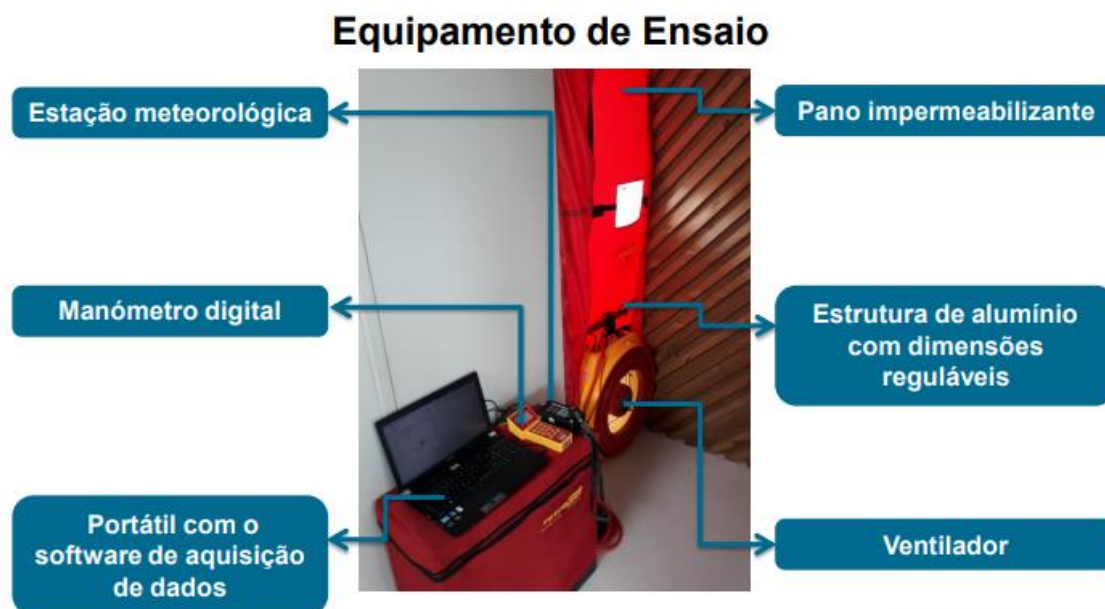


Figura 9 – Esquema do equipamento necessário para a realização do Blower door test. Fonte: PHPT (2018).

2.15 Sistemas técnicos para climatização e preparação de AQS

Neste subcapítulo serão apresentados os sistemas técnicos mais comuns para climatização e preparação de águas quentes sanitárias em Portugal. Esses sistemas serão estudados no decorrer deste trabalho.

2.15.1 Caldeira a gás

A caldeira a gás possui um sistema de aquecimento central que pode ser utilizado tanto para AQS quanto para aquecimento do ar ambiente. Novas tecnologias permitem que o aquecimento dos cômodos seja feito através de pisos radiantes. O sistema possui emissão de CO₂ maior em comparação a outros sistemas de aquecimento.

Como alternativa para diminuir a emissão de CO₂, foram desenvolvidas as caldeiras de condensação a gás. A principal diferença é que, ao contrário do sistema convencional que permite a saída dos gases de combustão para a atmosfera, no sistema de condensação a energia contida nesses gases é reutilizada, tornando o sistema mais eficiente e menos poluente. Um esquema de funcionamento desses dois tipos de caldeiras a gás estão apresentado na Figura 10.



Figura 10 - Esquema de funcionamento de caldeira convencional a gás e de caldeira de condensação a gás. Fonte: ATD-RM (2015).

2.15.2 Caldeiras de biomassa

A biomassa, do ponto de vista energético, pode ser definida como toda matéria orgânica, seja ela de origem animal ou vegetal, que possa ser utilizada para produção de energia (Seye, 2003).

Segundo Cortez (2008), a biomassa para produção de energia “pode ser obtida de vegetais não-lenhosos, de vegetais lenhosos, como é o caso da madeira e seus resíduos, e também de resíduos orgânicos”.

Lenhas e pallets são os materiais mais comuns utilizados para combustão e fonte de energia para as caldeiras. Por se tratar de uma energia renovável e com baixa emissão de poluentes, a caldeira de biomassa pode ser considerada uma das melhores soluções para aquecimento considerando critérios ambientais.

2.15.3 Salamandra

A salamandra é outro sistema de aquecimento que permite a utilização de biomassa, utilizando lenha e pallets como fonte de energia natural. O sistema é utilizado para climatização do ambiente e possui baixa emissão de CO₂. Uma vantagem é a não necessidade de instalação de chaminés, ocupando menos espaço como um todo e proporcionando sua instalação em diversos cômodos do edifício de habitação.

2.15.4 Bomba de calor ar-água

O funcionamento de uma bomba de calor pode ser comparado ao inverso do funcionamento de um refrigerador. Em uma bomba de calor o ar exterior é introduzido ao interior do edifício através de um sistema de aquecimento. Para proporcionar o aumento interior, é extraído o ar ambiente que é utilizado para vaporizar o líquido refrigerante presente na bomba. O gás resultante é comprimido e aquecido, para transmitir calor para a água de aquecimento ou para a AQS (Viessmann, 2019).

A bomba de calor ar-água apresenta baixo consumo de energia e zero de emissão de CO₂. É possível acoplar painéis fotovoltaicos ao sistema para aumenta sua eficiência e rendimento. Fornecedores de energia aerotérmicas são outra fonte de energia renovável que pode ser acoplado ao sistema.

2.15.5 Ar condicionado

O uso de ar condicionado é um dos sistemas mais utilizados para o arrefecimento de edifícios. O equipamento pode ser acoplado a uma bomba de calor permitindo o aquecimento do ambiente. Sistemas modernos possuem menor consumo de energia, zero emissão de CO₂ e purificação do ar. Assim como as bombas de calor, ar condicionados também permitem a acoplagem de painéis fotovoltaicos para aumento de eficiência e rendimento.

2.16 Soluções construtivas para paredes opacas

Neste subcapítulo será apresentado o sistema ETICS, solução corrente em Portugal, e um sistema certificado para *Passive House*.

2.16.1 Sistema ETICS

O Sistema de Isolamento Térmico pelo Exterior, ou ETICS, é um método de aplicação de isolantes térmico sobre a face de uma parede exterior, sendo em seguida revestido por uma fina camada de reboco armado e por último um revestimento apropriado com boa resistência mecânica para receber pintura ou outros materiais decorativos (APFAC, 2015).

Entre as principais vantagens do sistema ETICS estão a eliminação de pontes térmicas, a redução do risco de condensações interiores e a melhoria do conforto térmico nas estações de aquecimento e arrefecimento. Outros aspectos importantes são a economia de energia em razão do reforçado tratamento térmico e a facilidade do sistema para reabilitação de edifícios sem que seja necessário o desalojamento. O detalhamento do sistema está apresentado na Figura 11.

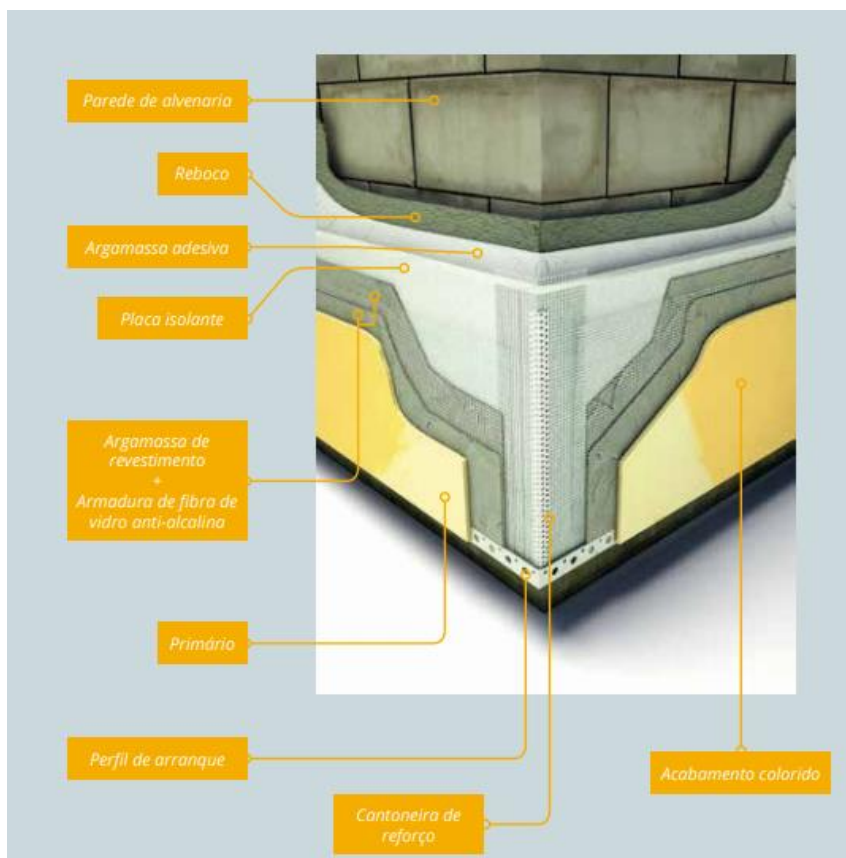


Figura 11 - Exemplificação do Sistema ETICS. Fonte: APFAC (2015).

2.16.2 Sistema de fachadas para *Passive House*

Para atender aos critérios estabelecidos pelo PHI, são adotadas nas fachadas soluções para manter a uniformidade da capa de isolamento, a fim de evitar pontes térmicas, membranas herméticas para o interior, além de fitas de vedação para evitar exfiltrações e infiltrações. Na 6ª Conferência *Passivhaus* Portugal, sediada na cidade de Aveiro nos dias 28 e 29 de novembro de 2019, foi apresentada a primeira solução certificada para um sistema de fachadas no país.

A solução foi desenvolvida em uma parceria de quatro empresas: Knauf®, Aquapanel®, Knauf Insulation® e Siga®. A descrição da solução está apresentada na Figura 12.

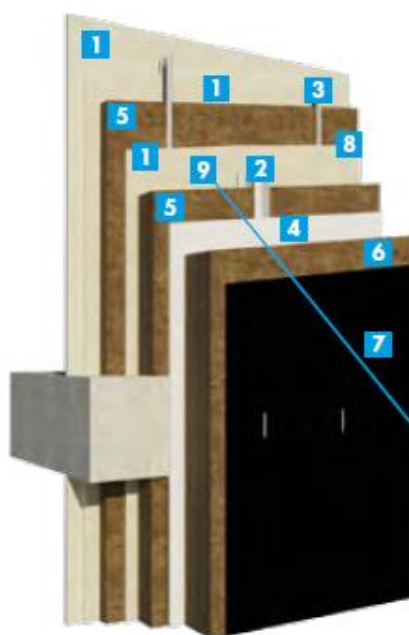
COMPONENTES DO SISTEMA

kNAUF

- 1 Placa de gesso laminado Knauf tipo A
- 2 Perfis Knauf GRC de Aço Galvanizado
- 3 Perfis interior de PVL

AQUAPANEL®

- 4 Placa de cimento Knauf Aquapanel Outdoor



kNAUFINSULATION

- 5 Lã mineral Ultracoustic
- 6 Lã mineral Naturall 032
- 7 Membrana Homeseal LDS 0,02 UV

SIGA

- 8 Membrana inteligente Majrex
- 9 Banda Adesiva Sicrall Encontro da fita Fentrim 20 com a laje e a parede



Fita Fentrim vista interior

Figura 12 - Componentes de sistema de fachada certificada pelo PHI. Fonte: Knauf (2019)

A solução foi desenvolvida segundo os critérios para a Europa central. Na Figura 12 é possível observar o isolamento térmico dividido em três camadas que atinge um valor de U de $0,10 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$. O sistema possui pontes térmicas com valores muito baixo, sendo $\Psi = 0,01 \text{ W}/(\text{mK})$, além de ser altamente hermética. O sistema possui uma espessura de aproximadamente 36 cm (Knauf, 2019).

Embora essa seja uma solução certificada, ela não é uma imposição do tipo de construção do edifício. O projetista é livre para adotar um sistema de fachada próprio, desde que atenda aos critérios exigidos pelo PHI. As soluções certificadas, no entanto, apresentam resultados comprovados pelo Instituto.

3 METODOLOGIA

A partir de um projeto base de um edifício residencial em Portugal serão avaliadas alternativas construtivas que atendam às exigências mínimas do REH. Para essa solução serão estudadas combinações de sistemas técnicos para aquecimento, arrefecimento e preparação de AQS e a partir dos balanços energéticos obtidos será verificado se os requisitos para que a habitação seja considerada NZEB foram atendidos. Em caso negativo, serão propostas alterações na envolvente para alcançar os requisitos obrigatórios a partir de 2021. Paralelamente, serão avaliadas soluções construtivas que sigam o conceito *Passive House* e que cumpram as exigências mínimas do REH.

Para a construção de *Passive Houses* em locais com invernos rigorosos já existem diversos estudos disseminados que apresentam a eficiência do conceito e a sua respectiva avaliação financeira. Em razão disso, buscou-se avaliar a aplicação do conceito em cidades com invernos mais amenos e com necessidades menores de aquecimento. Por se tratar das duas principais cidades do país e por pertencerem a zona térmica I1, foram escolhidas para estudo neste trabalho as cidades de Porto e de Lisboa.

De forma a buscar soluções mais padronizadas, o projeto base apresentará a mesma altitude e orientação de fachada para as duas cidades avaliadas.

Após a definição das soluções construtivas e do cálculo do balanço energético para cada situação, será avaliado o retorno financeiro para cada uma. Assim, será possível comparar a Solução *Passive House* com as soluções térmicas correntes em Portugal para atender as exigências da Portaria n.º 98/2019.

3.1 Descrição do edifício

Para poder comparar o método utilizando o PHPP com o REH foi definida uma edificação comum para as cidades de Porto e de Lisboa. O edifício estará localizado em uma altitude de 100 m e com uma fachada principal inclinada 13º em relação ao norte.

O edifício de estudo é um edifício residencial T4 com dois pavimentos, cave e sótão, representativo da construção nova atual de moradias unifamiliares, em Portugal, a nível dimensional e distribuição de espaços.

A habitação está dividida por pavimento da seguinte maneira:

- Cave: escadaria, garagem e casa de máquinas;
- Primeiro Pavimento (1P): escadaria, lavanderia, cozinha, hall, sala de refeições, sala de estar, instalação sanitária e escritório;
- Segundo pavimento (2P): escadaria, 4 quartos, 3 instalações sanitárias e corredor;
- Sótão: escadaria, 2 arrumos e espaço central.

As plantas baixas da cave e do rés-de-chão estão apresentadas na Figura

13.

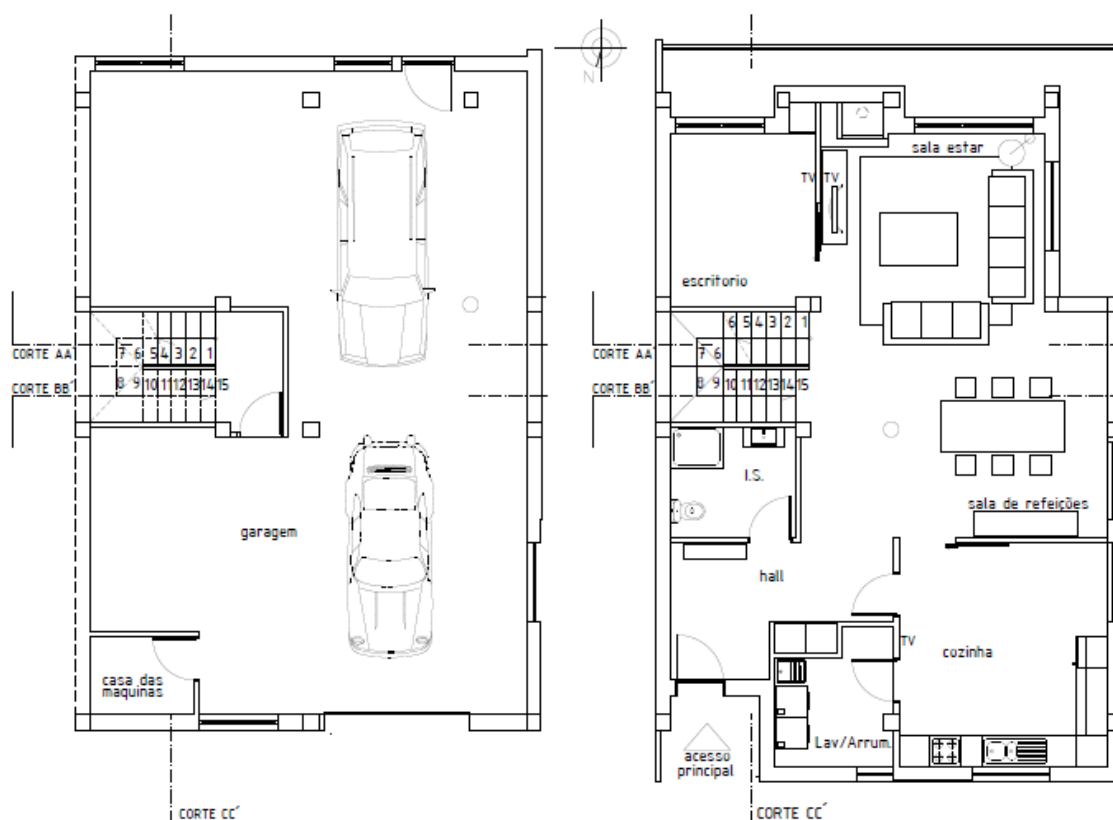


Figura 13 - Planta baixa da cave à esquerda e planta baixa do rés-de-chão à direita.

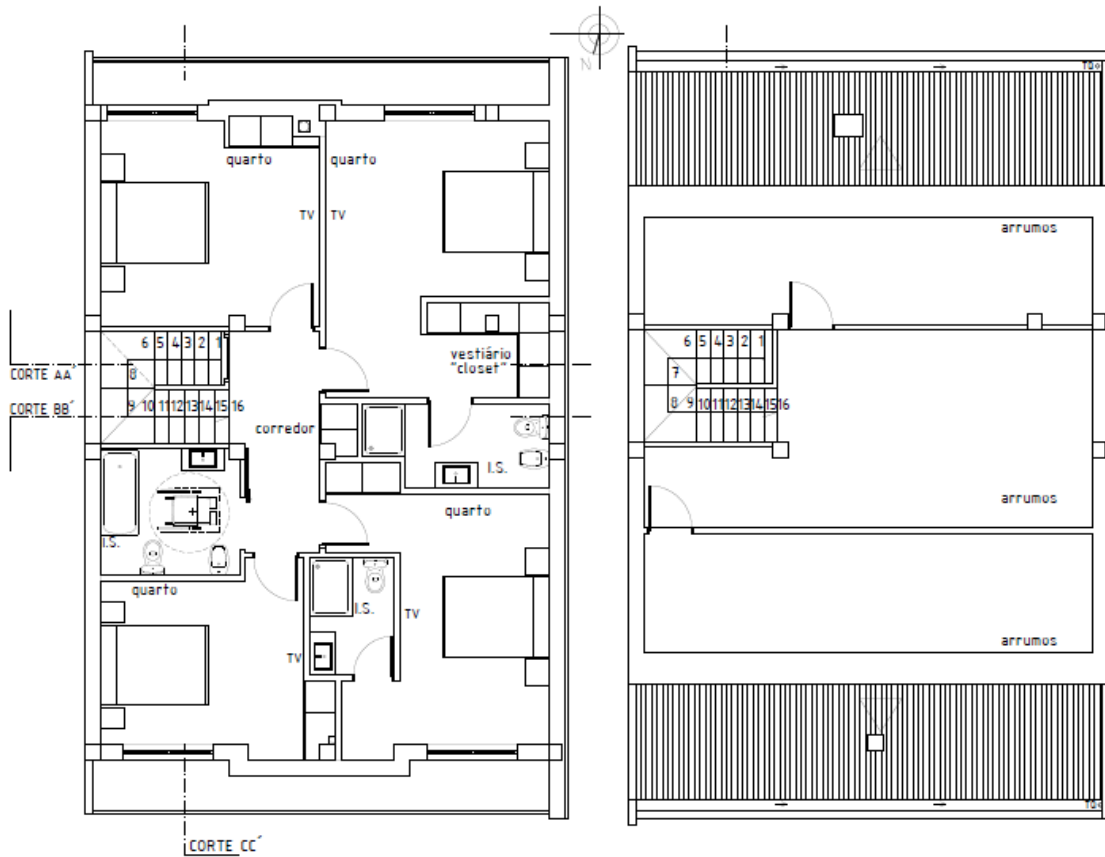


Figura 14 - Planta baixa do 1º piso à esquerda e planta baixa do sótão à direita.

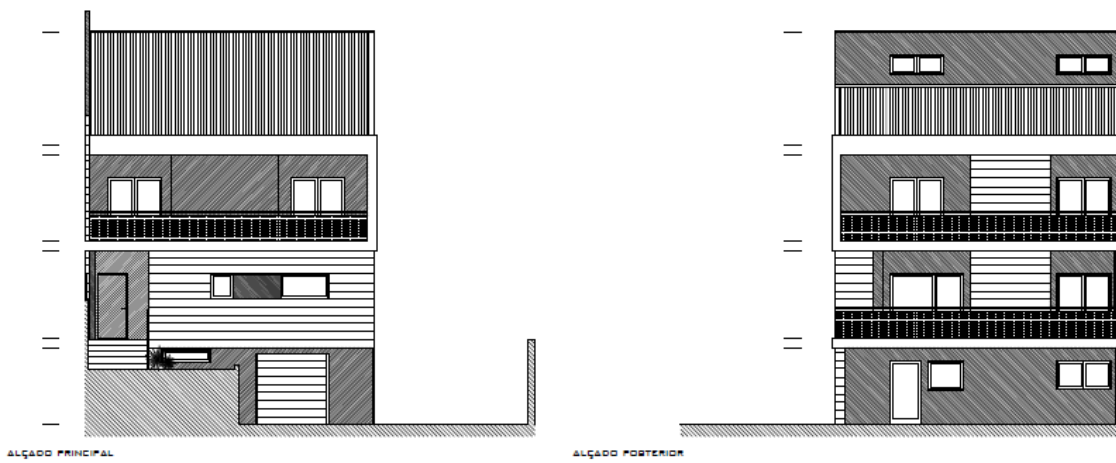


Figura 15 - Elevação principal à esquerda e elevação posterior à direita.

Os cortes AA', BB' e CC' da edificação estão apresentados nas Figuras 16 e 17, para melhor compreensão do projeto.

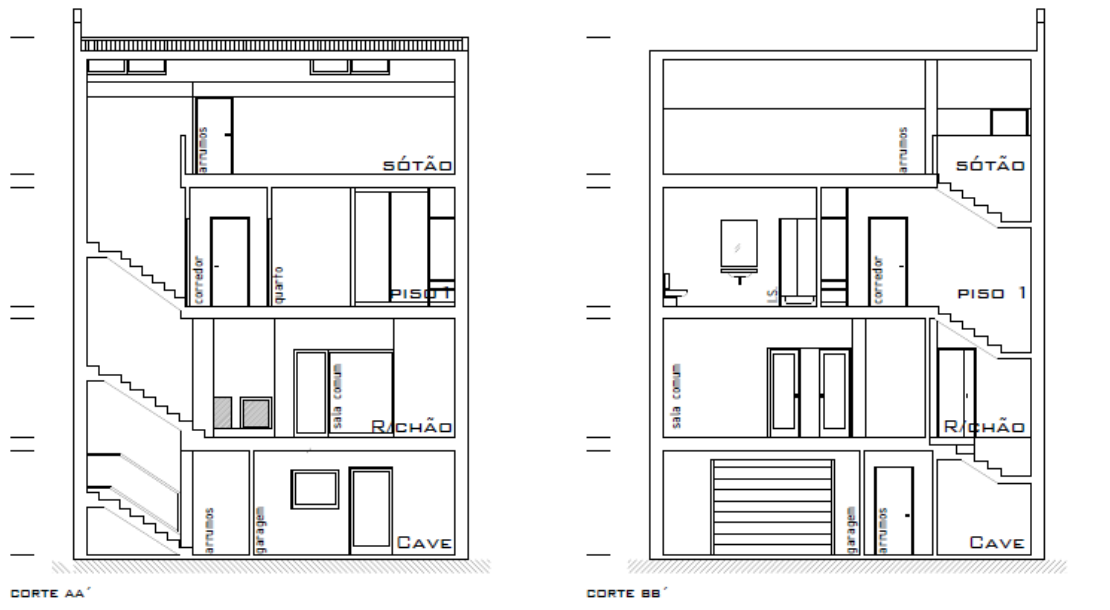


Figura 16 - Cortes AA' e BB' do edifício.

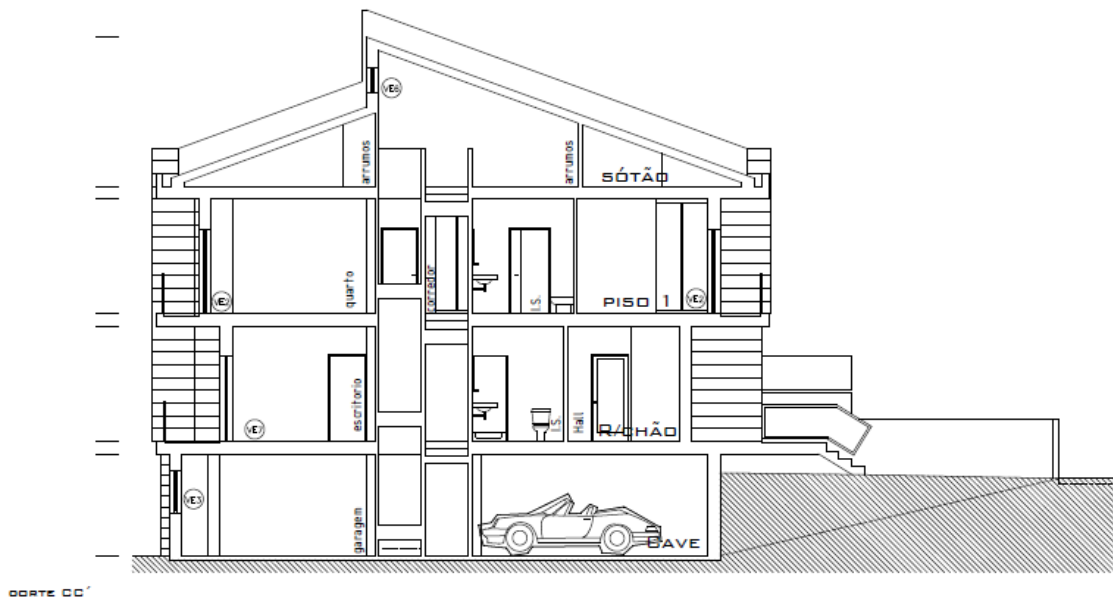


Figura 17 - Corte CC'.

3.2 Coeficiente de redução de perdas

Os coeficientes de redução de perdas, b_{tr} , para os espaços não úteis serão calculados segundo a metodologia exposta no artigo 11 do Despacho nº 15793 – K/2013. A metodologia escolhida define o valor de b_{tr} de acordo com a razão A_i/A_u , o volume do espaço não útil estudado e a presença ou não de

aberturas de ventilação permanentemente abertas no local. Sendo, A_i somatório das áreas dos elementos que separam o espaço interior útil do espaço não útil e A_u o somatório das áreas dos elementos que separam o espaço não útil do ambiente exterior.

A partir dos valores de b_{tr} encontrados, será traçada a envolvente do edifício. Para o traçado da envolvente exterior foram utilizadas linhas de cor vermelha, para a envolvente interior com requisitos de interior foram utilizadas linhas de cor azul e para a envolvente interior com requisitos de exterior foram utilizadas linhas de cor amarela.

Para diferenciar os tipos da envolvente, será utilizada uma linha contínua em planta para definir as paredes da envolvente, linhas cruzadas perpendiculares para definir os pavimentos da envolvente e linha inclinadas paralelas para definir a cobertura.

3.3 Coeficientes de transmissão térmica para elementos opacos

Para o cálculo dos coeficientes de transmissão térmica U de elementos opacos será usada a metodologia apresentada no Despacho nº 15793-K/2013. Para valores dos coeficientes de resistência térmicas serão usados valores disponibilizados por fornecedores e por Santos (2006). A formulação geral para o cálculo de U está apresentada na Equação 1.

$$U = \frac{1}{R_{si} + \sum_j R_j + R_{se}} \quad (\text{Equação 1})$$

Sendo que,

R_j – resistência térmica da camada j , em ($m^2 \cdot ^\circ C/W$);

R_{si} – resistência térmica superficial interior, em ($m^2 \cdot ^\circ C/W$);

R_{se} – resistência térmica superficial exterior, em ($m^2 \cdot ^\circ C/W$).

Os valores encontrados de U para cada solução devem respeitar os valores máximos admissíveis segundo a última atualização do REH, válida a partir de 1 de janeiro de 2016, para a zona térmica I1. Para a solução *Passive House* serão usados os valores que foram apresentados na Tabela 3 e os

valores máximos admissíveis exigidos pelo REH, buscando utilizar sempre o critério mais rigoroso entre os dois.

3.4 Elementos envidraçados

Para os coeficientes de transmissão térmica U_w de elementos envidraçados serão utilizados os valores fornecidos por fabricantes e por Santos (2006). As soluções devem respeitar os valores máximos admissíveis, segundo a última atualização do REH válida a partir de 1º de janeiro de 2016, para a zona térmica I1. Para a solução *Passive House* devem ser respeitados também os valores máximos definidos pelo PHI para cada uma das duas cidades.

Para os vãos envidraçados é levar em consideração o efeito de ganhos térmicos na estação de aquecimento e na estação de arrefecimento. O fator g_{LVI} representa a incidência solar normal superfície do vão, sendo corrigida por um fator que corresponde a variação da incidência da radiação solar, segundo a orientação do vão em relação ao sol.

Para a solução *Passive House* serão usados os valores fornecidos pelos fabricantes, tentando utilizar componentes que sejam certificados pelo PHI. Para outras soluções serão usados os parâmetros fornecidos pelo artigo 7 do Despacho nº. 15793-K/2013.

3.5 Pontes térmicas lineares

O artigo 3 do Despacho nº 15793-K/2013 fornece valores por defeito para os coeficientes Ψ de transmissão térmica lineares. O coeficiente Ψ multiplicado pelo comprimento total do elemento representa a perda de calor pelas pontes térmicas lineares. O valor de Ψ depende do tipo de ligação e o sistema de isolamento de paredes. Serão calculados os comprimentos totais para cada um desses tipos de ligações.

3.6 Inércia térmica

A inércia térmica é calculada segundo o artigo 6 do Despacho nº 15793-K/2013. A expressão tem o resultado em [kg/m²] e representa a massa superficial útil por metro quadrado de área do pavimento, I_t , conforme equação 2.

$$I_t = \frac{\sum_i M_{S_i} * r * S_i}{A_p} \quad (\text{Equação 2})$$

Sendo,

M_{S_i} – massa superficial útil do elemento i , em [kg/m²];

r – fator de redução da massa superficial útil;

S_i – área da superfície interior do elemento i , em [m²];

A_p – área interior útil de pavimento, em [m²].

A classificação de inércia térmica interior está apresentada na tabela 4, dividida em três classes em função do intervalo de inércia.

Tabela 4 - Classes de inércia térmica interior. Fonte: Despacho n.º 15793-K/2013.

Classe de inércia térmica	I_t [kg/m ²]
Fraca	$I_t < 150$
Media	$150 \leq I_t \leq 400$
Forte	$I_t > 400$

3.7 Soluções construtivas

Para padronização das soluções construtivas serão definidos materiais base a serem utilizados nas duas metodologias de cálculo, tanto para o REH quanto para as exigências do PHI. O sistema ETICS será usado nos dois casos para isolamento da envolvente térmica, tendo placas de XPS como material isolante principal.

Os elementos envidraçados serão escolhidos de acordo com as diferentes exigências de cada método. Para o REH serão usados vidros duplos com caixilharia em PVC com valores padrões disponibilizados pela Legislação específica portuguesa e por Santos (2006), enquanto para o PHPP serão

utilizadas caixilharias e vidros duplos que atendam ao valores disponibilizados na Tabela 3.

3.8 Sistemas técnicos

Para melhor comparação entre as soluções que atendam exclusivamente ao REH e as soluções *Passive House* serão definidos diferentes sistemas técnicos para climatização e preparação de AQS. Serão utilizadas soluções correntes a fim de se comparar seus impactos no custo da construção e no desempenho energético do edifício.

Para as soluções que atendam exclusivamente ao REH serão avaliados os seguintes sistemas técnicos: salamandra, caldeiras de condensação a gás, caldeiras de biomassa, bombas de calor, ar condicionado do tipo multi-split e esquentador a gás. Será avaliado também um sistema com coletores térmicos solares para preparação de AQS. Para casos em que haja outro sistema técnico com fonte de energias renováveis para a preparação de AQS, será descartado o uso dos coletores solares.

Para as soluções *Passive House* será utilizada uma solução com coletores solares térmicos para AQS com um esquentador a gás de apoio, um sistema de ventilação com recuperação de calor para aquecimento e um sistema de ar condicionado para arrefecimento.

3.9 Cálculo das necessidades energéticas

Os valores encontrados para os coeficientes de transmissão térmica, de redução de perdas, fatores solares dos envidraçados e sistemas técnicos serão inseridos pela ferramenta em XML fornecida gratuitamente pelo Itecons. A ferramenta foi criada com base no DL 118/2013 para o cálculo do balanço energético e para auxiliar à emissão do Certificado Energético. Existem outras ferramentas disponíveis que poderiam ter sido utilizadas, mas por experiência anterior preferiu-se utilizá-la neste trabalho. A versão utilizada foi a V3.10 de 9 de novembro de 2017.

O primeiro passo é identificar o imóvel e a região geográfica na qual está inserido. A seguir é necessário informar as características do imóvel e realizar

um levantamento dimensional, informando a área e o pé direito médio para cada cômodo da edificação. Automaticamente a ferramenta calcula o volume do cômodo e a sua porcentagem de área em relação ao total da edificação.

Tendo preenchido essas informações iniciais relacionadas as características do imóvel e onde está inserido, inicia-se o processo de informar as soluções construtivas adotadas na envolvente, diferenciando elementos interiores e exteriores. A envolvente é dividida em paredes, pavimentos, vão envidraçados, pontes térmicas lineares, coberturas e elementos enterrados. É necessário também informar o coeficiente de redução de perdas dos espaços não úteis.

Conforme o preenchimento dos dados relacionados com as soluções construtivas, a ferramenta automaticamente informa os limites estabelecidos pelo REH e acusa se a solução adotada está dentro desses limites.

A classe de inércia térmica do edifício pode ser apenas informada ou pode ser usada a aba de apoio para o cálculo dela. Há espaço ainda para cálculos relativos à ventilação e aos sistemas técnicos adotados. A partir do preenchimento de todos esses dados relativos ao imóvel e às soluções adotadas a ferramenta realiza o balanço energético e informa classe energética a qual pertence.

3.10 Cálculos PHPP

A versão utilizada para este trabalho será o PHPP 9.6 O processo de cálculo do PHPP pode ser dividido em três etapas:

- Preenchimento das informações básicas relativas ao edifício (localização, tipo de edifício, entre outros), áreas, descrição construtiva da envolvente opaca para cálculo do U, características das janelas, dados relativos ao sombreamento e valores relativos à ventilação. A partir dessas informações são calculadas as necessidades de aquecimento e de carga de aquecimento;
- Preenchimento de dados relativos ao verão, a fim de calcular as necessidades de arrefecimento e a frequência de sobreaquecimento;

- Preenchimento dos dados relativos às necessidades de energia primária.

Para o cálculo de U será levado em consideração tanto as exigências do PHI quanto as exigências do REH, uma vez que este possui caráter obrigatório. Por estarem em constante atualização, serão utilizados os dados presentes no sítio oficial do PHI que dispõe de todos os componentes atualmente certificados pelo Instituto. A plataforma disponibiliza todas as informações necessárias dos componentes para preenchimento do PHPP.

3.11 Análise Financeira

A partir das soluções apresentadas serão comparados os custos de equipamento, mão de obra e instalação para cada situação. Para a solução *Passive House* serão utilizados também os custos para a melhoria da envolvente, como aumento do isolamento, estanqueidade e caixilharias. A diferença entre esses custos será o custo de investimento utilizado para o cálculo do *Payback*.

O retorno financeiro será a poupança energética da solução *Passive House* em relação as demais soluções. Serão avaliados tanto o *Payback* simples quanto o descontado, em que é considerado uma taxa de desconto. O *Payback* simples está apresentado na Equação 3.

$$PBS = \frac{CI}{PE} \quad (\text{Equação 3})$$

Sendo que,

PBS – *Payback* Simples, em anos;

CI – Custo de Investimento, em euros;

PE – Poupança energética anual.

O *Payback* descontado utiliza uma taxa de desconto, no caso um Taxa Mínima de Atratividade ou TMA, como comparação à outras formas de investimento. O *Payback* descontado está apresentado na Equação 4.

$$CI = \sum_{t=1}^{PBD} \frac{PE}{(1+TMA)^t} \quad (\text{Equação 4})$$

Sendo que,

CI – Custo de Investimento, em euros;

PBD – *Payback* Descontado, em anos;

TMA – Taxa Mínima de Atratividade;

PE – Poupança energética anual.

A Equação 4 traz o retorno anual para o valor presente, considerando assim o valor do dinheiro no tempo. Consequentemente, o *Payback* Descontado é maior que o Simples. Será considerado para este trabalho um valor de 2% para a TMA.

A comparação será feita entre as soluções *Passive House* e as soluções correntes para atender às exigências da Portaria nº 98/2019, uma vez que o objetivo do estudo é apresentar as potencialidades do sistema *Passive House* para fazer face às exigências de edifícios com necessidades energéticas quase nulas. Em razão disso, os tempos de retorno podem ser mais elevados dos que os apresentados em estudos anteriores, nos quais era realizada uma comparação com edifícios que atendiam os requisitos mínimos do REH, o que não faria sentido neste trabalho.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Cálculo B_{tr}

O edifício foi separado em espaços úteis e não úteis de acordo com a utilização feita pelo usuário. A divisão apresentada divisão dos cômodos é a seguinte:

- Espaços não úteis: garagem, casa das máquinas, lavanderia e arrumos;
- Espaços úteis: escadas, escritório, sala de refeições, instalações sanitárias, hall, cozinha, sala de estar, quartos e corredor.

O levantamento dimensional dos espaços úteis está apresentado na Tabela 5.

Tabela 5 - Levantamento dimensional dos espaços úteis da habitação.

Divisão	Área (m ²)	Pé direito (m)	Divisão	Área (m ²)	Pé direito (m)
Hall	9,40	2,70	Cozinha	17,20	2,70
Sala	58,80	2,70	Escritório	9,60	2,70
IS1	5,15	2,70	Quarto 1	15,60	2,70
IS2	5,10	2,70	Quarto 2	21,50	2,70
IS3	6,15	2,70	Quarto 3	13,40	2,70
IS4	3,50	2,70	Quarto 4	17,15	2,70
Corredor	6,45	2,70	Sótão	25,80	1,90
Escada	8,00	2,70	-	-	-

Somando as áreas dos espaços úteis apresentados na Tabela 5 encontra-se um área útil total de 222,80 m² para a habitação. O pé direito médio calculado é de 2,60 m com um volume aproximado de 580,92 m³.

Através da separação dos espaços úteis e não úteis da habitação foram calculados os valores de B_{tr} para a garagem, a casa de máquinas, a lavanderia e os arrumos. O valor final do somatório A_i das áreas dos elementos que separam o espaço interior útil do espaço não útil está apresentado na Tabela 6.

Tabela 6 - Cálculo de A_i para espaços não úteis.

Espaços não úteis	Pavimento inferior [m²]	Pavimento superior [m²]	Paredes [m²]	A_i [m²]
Garagem	-	86,40	9,00	95,40
Casa de máquinas	-	1,89	-	1,89
Lavanderia	-	3,79	16,28	20,07
Arrumo 1	30,67	-	14,36	45,03
Arrumo 2	24,10	-	12,18	36,28

O somatório A_u das áreas dos elementos que separam o espaço não útil do ambiente exterior estão apresentados na Tabela 7.

Tabela 7 - Cálculo de A_u para espaços não úteis.

Espaços não úteis	Pavimento inferior [m²]	Pavimento superior [m²]	Paredes [m²]	A_u [m²]
Garagem	-	14,65	84,96	99,61
Casa de máquinas	-	1,11	8,40	9,51
Lavanderia	1,61	1,61	11,48	14,70
Arrumo 1	7,13	38,72	-	45,85
Arrumo 2	7,40	33,60	-	41,00

Os valores encontrados de B_{tr} para cada espaço não útil estão apresentados na Tabela 8.

Tabela 8 - Definição do coeficiente de perdas para os espaços não úteis.

Espaços não úteis	Pé direito [m]	Área [m²]	Volume [m³]	A_i/A_u	B_{tr}
Garagem	2,40	91,80	220,32	0,96	0,9
Casa de máquinas	2,40	3,00	7,20	0,20	1
Lavanderia	2,70	5,40	14,58	1,37	0,6
Arrumo 1	1,01	37,80	38,18	0,98	0,7
Arrumo 2	0,78	31,50	24,57	0,88	0,7

Com os valores de b_{tr} foram definidos os espaços não úteis com requisitos de interior e com requisitos de exterior. Segundo o Despacho nº15793-K/2013, os espaços não úteis com valor de b_{tr} inferior ou igual a 0,7 apresentam requisitos de interior. Abaixo está feita a divisão dos espaços não úteis em função de seus requisitos:

- Requisitos de exterior: garagem e casa de máquinas;
- Requisitos de interior: lavanderia, arrumo 1 e arrumo 2.

4.1.1 Traçados da envolvente

Foram desenvolvidos os traçados das envoltentes de acordo com os valores de b_{tr} encontrados para os espaços não úteis para o edifício de estudo. Considerou-se que o edifício não tem nenhum contato com edifícios vizinhos. Nas Figuras 18 e 19 estão apresentados os traçados das paredes para todos os pavimentos do edifício, seguindo as indicações de cor e linha apresentadas na Metodologia.

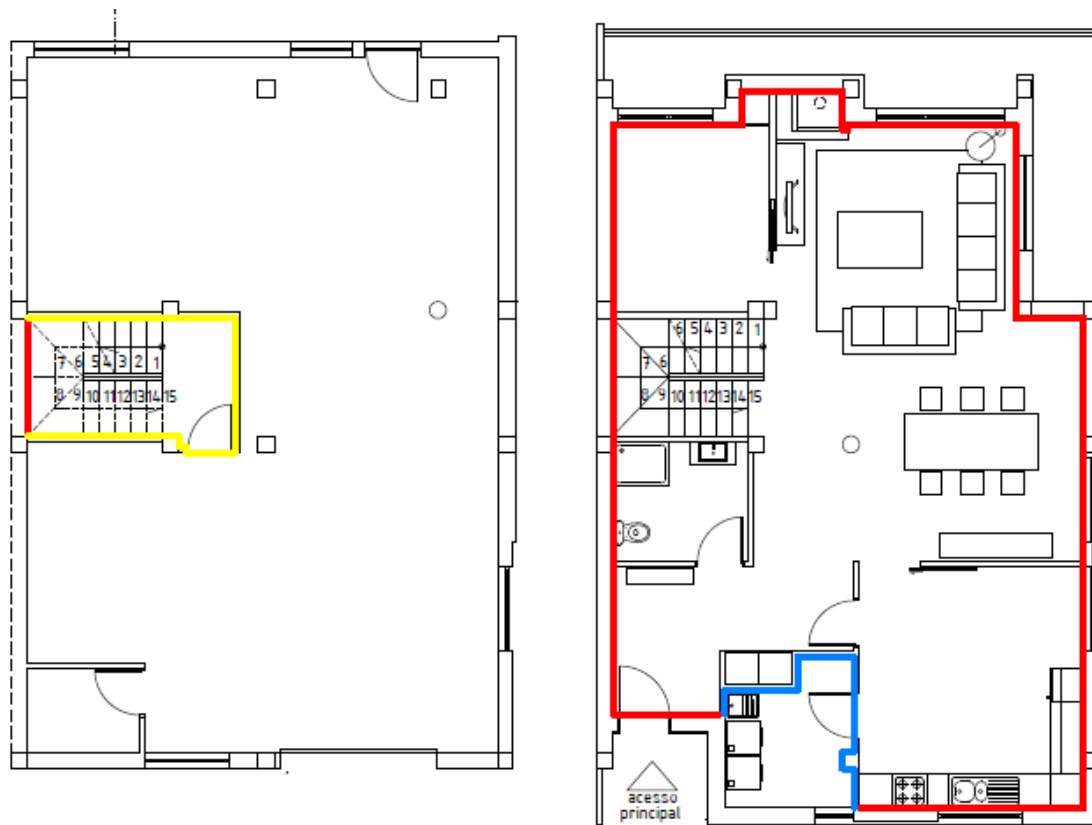


Figura 18 - À esquerda o traçado das paredes da envolvente na cave e à direita o traçado das paredes da envolvente no rés-de-chão.

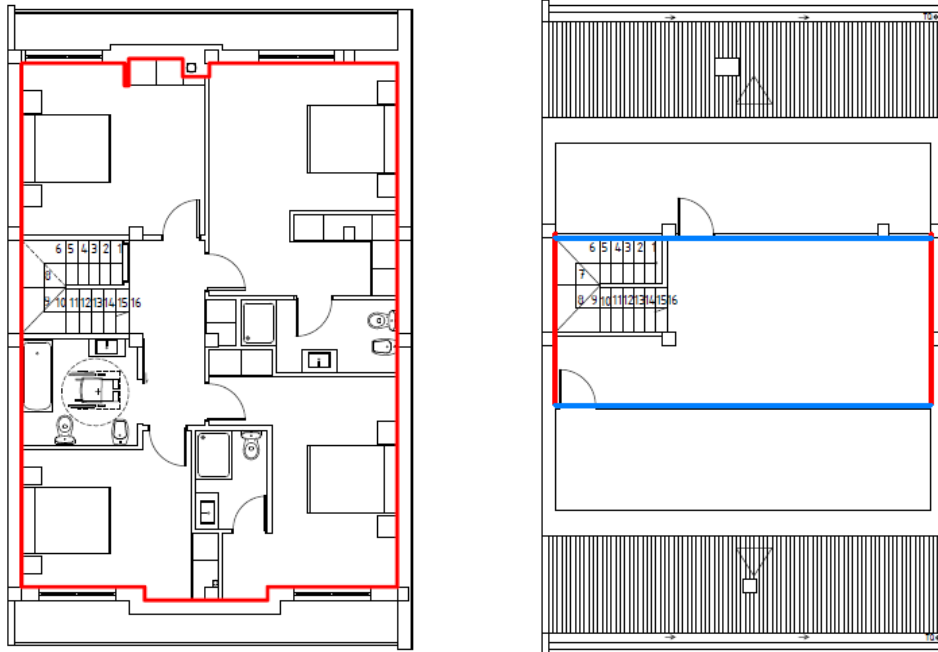


Figura 19 - À esquerda o traçado das paredes da envolvente no primeiro piso e à direita o traçado das paredes da envolvente no sótão.

O traçado dos pavimentos para todos os pavimentos estão apresentados nas Figura 20 e 21.

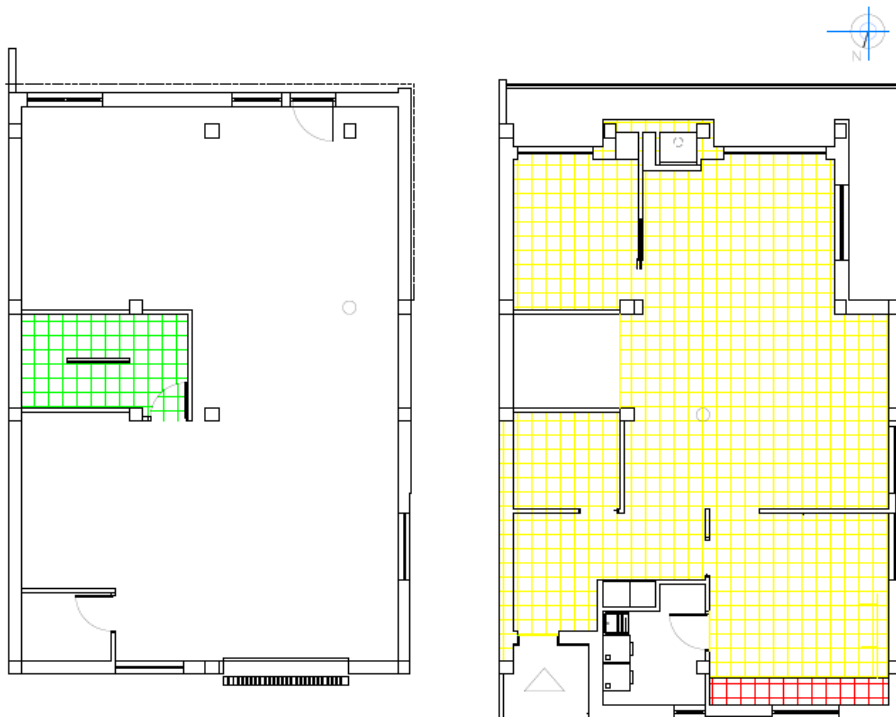


Figura 20 - À esquerda o traçado dos pavimentos da envolvente na cave e à direita o traçado dos pavimentos da envolvente no rés-de-chão.



Figura 21 - À esquerda o traçado dos pavimentos da envolvente no primeiro piso e à direita o traçado dos pavimentos da envolvente no sótão

O traçado das coberturas para todos os pavimentos estão apresentados nas Figura 22 e 23.

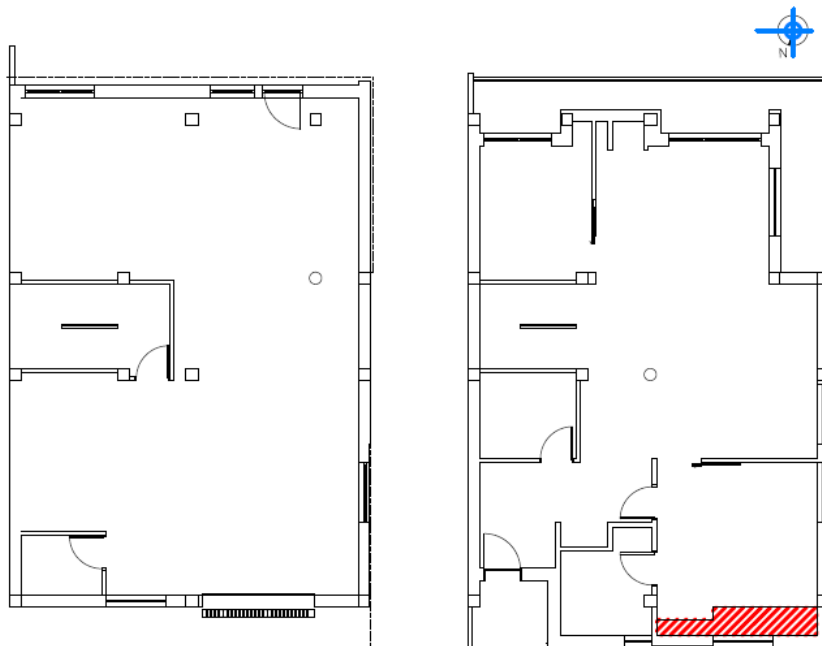


Figura 22 - À esquerda o traçado das coberturas da envolvente na cave e à direita o traçado das coberturas da envolvente no rés-de-chão.

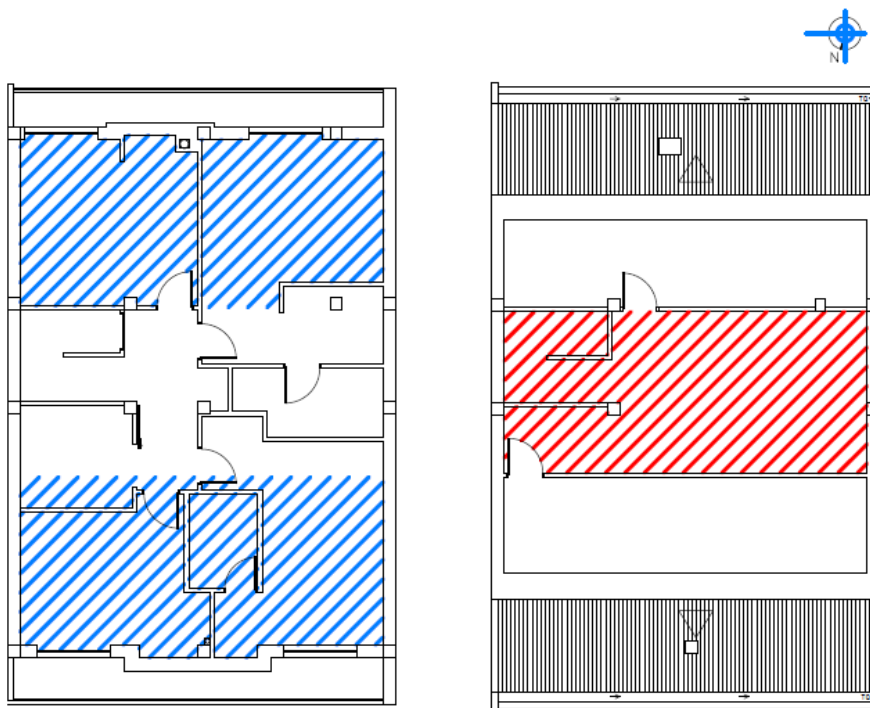


Figura 23 - À esquerda o traçado das coberturas da envolvente no primeiro piso e à direita o traçado das coberturas da envolvente no sótão.

4.2 Cálculo coeficiente de transmissão térmica elementos opacos

4.2.1 Solução segundo regulamentação portuguesa

Para o cálculo dos coeficientes de transmissão térmica dos elementos opacos da habitação buscou-se igualar as exigências mínimas do REH e também atender aos critérios NZEB presentes na Portaria n.º 98/2019. Para obter uma razão entre N_{ic} e N_i que seja igual ou inferior a 0,75, foi necessário aumentar o isolamento nas paredes interiores e exteriores. Para as paredes exteriores foi usada uma solução com U igual a $0,34 \text{ W}/(\text{m}^2.\text{K})$, significativamente menor que $0,50 \text{ W}/(\text{m}^2.\text{K})$, exigência mínima do REH. Para as paredes interiores a solução apresentou U igual a $0,74 \text{ W}/(\text{m}^2.\text{K})$, valor bem distante de $2,00 \text{ W}/(\text{m}^2.\text{K})$, exigência mínima do REH.

As soluções apresentadas são válidas para as regiões de Lisboa e Porto, uma vez que ambas estão localizadas nas zonas térmicas I1 e V2. As soluções construtivas iniciais adotadas para o REH estão apresentadas na Tabela 9.

Tabela 9 - Descrição da solução proposta para elementos opacos da envolvente térmica, segundo exigências do REH.

Zona da Envolvente	Descrição da Solução	U [W/(m².K)]
Parede exterior	Parede com tijolos cerâmicos com 22 cm de espessura, placa de isolamento XPS de 6 cm pelo exterior e reboco de cimento	0,34
Parede interior	Parede simples com tijolos cerâmicos de 9 cm de espessura, placa de isolamento XPS de 3 cm pelo exterior, gesso acartonado e reboco de cimento	0,74
Pavimento interior com requisitos de exterior (áreas úmidas)	Gesso acartonado 13 mm, placa de isolamento XPS de 7 cm pelo exterior, laje aligeira com 23 cm de espessura, betonilha de regularização (R150), mosaico cerâmico de 10 mm	0,40
Pavimento interior com requisitos de exterior (áreas não úmidas)	Gesso acartonado de 13 mm, placa de isolamento XPS de 6 cm pelo exterior, laje aligeira com 23 cm de espessura, betonilha de regularização (R150), piso de madeira	0,40
Pavimento interior com requisitos de interior	Gesso acartonado de 13 mm, laje aligeira com 23 cm de espessura, betonilha de regularização (R150), argamassa térmica com cortiça, mosaico cerâmico	1,65
Pavimento exterior (áreas úmidas)	Placa de isolamento XPS de 7 cm, laje aligeirada com 23 cm de espessura, betonilha de regularização (R150), mosaico cerâmico de 10 mm	0,40
Pavimento exterior (áreas não úmidas)	Placa de isolamento XPS de 6 cm pelo exterior, laje aligeirada com 23 cm de espessura, betonilha de regularização (R150), piso em madeira	0,40
Cobertura interior	Gesso acartonado de 13 mm, placa de isolamento XPS de 1 cm, laje aligeirada com 15 cm de espessura, betonilha de regularização (R150), piso em madeira	1,40
Cobertura exterior	Placas de MDF de 16 mm, placa de isolamento XPS de 7 cm, painel OSB 15 mm, gesso acartonado 13 mm	0,40 (ascendente e descendente)

Para as pontes térmicas planas foram adotadas soluções iguais as soluções adotadas na envolvente adjacente. Dessa forma mantém-se a homogeneidade da parede e do isolamento. A descrição da solução proposta está apresentada na Tabela 10.

Tabela 10 - Solução descritiva proposta para as pontes térmicas planas do edifício, segundo exigências do REH.

Zona	Descrição da solução	U [W/(m ² .K)]
Ponte térmica plana exterior	Placa de isolamento XPS de 6 cm, betão com 30 cm de espessura, reboco de cimento	0,52
Ponte térmica plana interior	Placa de isolamento XPS de 3 cm, betão com 30 cm de espessura, reboco de cimento, mosaico cerâmico	0,81

4.2.2 Solução *Passive House*

Visando encontrar um edifício que atendesse aos critérios do REH e aos valores máximos de U apresentados na Tabela 3 para a região do Porto, foram propostas soluções mais rigorosas na envolvente em comparação a solução anterior.

Para a envolvente interior de um habitação *Passive House* em Portugal não existem valores de U para serem usados como parâmetro. Para o projeto da casa em Lisboa estudada pelo *Passive-On* foram utilizados valores elevados para os coeficientes de transmissão térmica das paredes interiores. A partir disso, tomou-se a decisão de igualar os valores de U da envolvente interior ao valores de U apresentados para a solução que segue unicamente as exigências do REH.

As soluções construtivas propostas para a cidade do Porto estão apresentadas na Tabela 11.

Tabela 11 - Descrição da solução proposta para elementos opacos da envolvente térmica, segundo exigências do REH e do PHI para a região do Porto.

Zona da Envolvente	Descrição da Solução	U [W/(m ² .K)]
Parede exterior	Parede com tijolos cerâmicos de 22 cm de espessura, placa de isolamento XPS de 13 cm pelo exterior e reboco de cimento	0,202
Parede interior	Parede simples com tijolos cerâmicos de 9 cm de espessura, placa de isolamento XPS de 3 cm pelo exterior, gesso acartonado e reboco de cimento	0,74
Pavimento interior com requisitos de exterior (áreas úmidas)	Gesso acartonado de 13 mm, placa de isolamento XPS de 6 cm pelo exterior, laje aligeira com 23 cm de espessura, betonilha de regularização (R150), mosaico cerâmico de 10 mm	0,400
Pavimento interior com requisitos de exterior (áreas não úmidas)	Gesso acartonado de 13 mm, placa de isolamento XPS de 6 cm pelo exterior, laje aligeira com 23 cm de espessura, betonilha de regularização (R150), piso de madeira	0,400
Pavimento interior com requisitos de interior	Gesso acartonado de 13 mm, laje aligeira com 23 cm de espessura, betonilha de regularização (R150), argamassa térmica com cortiça, mosaico cerâmico	1,65
Pavimento exterior (áreas úmidas)	Placa de isolamento XPS de 15 cm pelo exterior, laje aligeirada com 23 cm de espessura, betonilha de regularização (R150), mosaico cerâmico de 10 mm	0,202
Cobertura interior	Gesso acartonado de 13 mm, placa de isolamento XPS de 1 cm, laje aligeirada com 15 cm de espessura, betonilha de regularização (R150), piso em madeira	1,40
Cobertura exterior	Placas de MDF de 16 mm, placa de isolamento XPS de 20 cm, painel OSB 15 mm, gesso acartonado 13 mm	0,155

A descrição das soluções construtivas para os elementos opacos para a região de Lisboa estão apresentados na Tabela 12.

Tabela 12 - Descrição da solução proposta para elementos opacos da envolvente térmica, segundo exigências do REH e do PHI para a região de Lisboa.

Zona da Envolvente	Descrição da Solução	U [W/(m².K)]
Parede exterior	Parede com tijolos cerâmicos de 22 cm de espessura, placa de isolamento XPS de 6 cm pelo exterior e reboco de cimento	0,500
Parede interior	Parede simples com tijolos cerâmicos de 9 cm de espessura, placa de isolamento XPS de 3 cm pelo exterior, gesso acartonado e reboco de cimento	0,74
Pavimento interior com requisitos de exterior (áreas úmidas)	Gesso acartonado de 13 mm, placa de isolamento XPS de 6 cm pelo exterior, laje aligeira com 23 cm de espessura, betonilha de regularização (R150), mosaico cerâmico de 10 mm	0,400
Pavimento interior com requisitos de exterior (áreas não úmidas)	Gesso acartonado de 13 mm, placa de isolamento XPS de 6 cm pelo exterior, laje aligeira com 23 cm de espessura, betonilha de regularização (R150), piso de madeira	0,400
Pavimento interior com requisitos de interior	Gesso acartonado de 13 mm, laje aligeira com 23 cm de espessura, betonilha de regularização (R150), argamassa térmica com cortiça, mosaico cerâmico	1,65
Pavimento exterior	Placa de isolamento XPS de 8 cm, laje aligeirada com 23 cm de espessura, betonilha de regularização (R150), mosaico cerâmico de 10 mm	0,400
Cobertura interior	Gesso acartonado de 13 mm, placa de isolamento XPS de 1 cm, laje aligeirada com 15 cm de espessura, betonilha de regularização (R150), piso em madeira	1,40
Cobertura exterior	Placas de MDF de 16 mm, placa de isolamento XPS de 10 cm, painel OSB 15 mm, gesso acartonado 13 mm	0,330

Para a região de Lisboa os valores de U apresentados na Tabela 3 são menos severos, apresentando inclusive alguns valores máximos admissíveis menores que os exigidos pelo REH. Para paredes exteriores, por exemplo, a

tabela 3 fornece um valor máximo de U de 0,620 W/(m².K), enquanto o REH exige um valor máximo de 0,50 W/(m².K). Para casos similares foram utilizados os valores máximos exigidos pelo REH, uma vez que possuem caráter obrigatório.

A descrição da solução proposta para as pontes térmicas planas para a região do Porto está apresentada na Tabela 13.

Tabela 13 - Solução descritiva proposta para as pontes térmicas planas do edifício, segundo exigências do REH e do PHI para a região do Porto.

Zona	Descrição da solução	U [W/(m².K)]
Ponte térmica plana (área úmida)	Placa de isolamento XPS de 15 cm, betão com 30 cm de espessura, reboco de cimento	0,22
Ponte térmica plana (área não úmida)	Placa de isolamento XPS de 15 cm, betão com 30 cm de espessura, reboco de cimento, mosaico cerâmico	0,81

A descrição da solução proposta para as pontes térmicas planas para a região de Lisboa está apresentada na Tabela 14.

Tabela 14 - Solução descritiva proposta para as pontes térmicas planas do edifício, segundo exigências do REH e do PHI para a região de Lisboa.

Zona	Descrição da solução	U [W/(m².K)]
Ponte térmica plana (área úmida)	Placa de isolamento XPS de 6 cm, betão com 30 cm de espessura, reboco de cimento	0,52
Ponte térmica plana (área não úmida)	Placa de isolamento XPS de 3 cm, betão com 30 cm de espessura, reboco de cimento, mosaico cerâmico	0,81

O REH não estabelece critérios mínimos para portas opacas, apenas para elementos envidraçados. Desse modo, foi escolhida uma porta em madeira densa com U = 2,55 W/(m².K). Para as soluções *Passive House* existem

exigências para portas opacas e existe a possibilidade de inseri-las como elemento envidraçado no PHPP com fator de incidência solar nulo. Por isso, os dados das soluções propostas para portas opacas *Passive House* serão apresentadas junto com os elementos envidraçados.

A inércia térmica calculada para as soluções construtivas apresentadas foi de 422,36 kg/m², valor acima de 400 kg/m². Portanto a inércia térmica do edifício é considerada forte.

4.3 Elementos envidraçados

Os elementos envidraçados da solução proposta segundo exigências do REH utilizou valores fornecidos pelo Despacho nº 15793-K/2013. Foi definido um vidro duplo incolor 4 a 8 mm mais incolor 4 mm com caixilharia em PVC e cortinas opacas. Os dados relativos a essa solução estão apresentados na Tabela 15.

Tabela 15 - Dados relativos à solução proposta para vidros duplos segundo as exigências do REH.

Identificação	x (m)	h (m)	U [W/(m ² .K)]	g _{Lvi}	g _{Tvc}
PE4 (correr)	0,8	2,0	2,2	0,75	0,46
PE4 (fixa)	1,7	2,0	2,2	0,75	0,46
PE5	1,7	2,0	2,2	0,75	0,46
VE3	1,7	0,9	2,2	0,75	0,46
VE5	1,5	0,8	2,2	0,75	0,46
VE6	1,7	0,6	2,2	0,75	0,46

Para os vãos envidraçados da solução *Passive House* foi proposto um vidro duplo com coeficiente de transmissão térmica igual a 1,30 W/(m².K) e com fator solar de 0,60. Foram escolhidas caixilharias com corte térmico.

Há também a solução proposta para a porta opaca, tratada como um elemento envidraçado com incidência solar normal nula. Para essa solução foi proposta uma porta certificada com U = 0,73 W/(m².K).

4.4 Sistemas de ventilação

Para o edifício que atende exclusivamente as exigências do REH foram propostas aberturas de admissão reguladas manualmente nas fachadas com

540,00 cm² de aberturas e condutas de ventilação natural de exaustão nas casas de banho. Nas condições nominais obteve-se um resultado estimado de 0,40 renovações por hora.

Para a solução *Passive House* foi adotada uma unidade de ventilação Zehnder® ComfoAir Q350 HRV com recuperação de calor. A unidade possui uma eficiência de aproximadamente 90% na recuperação de calor e eficiência elétrica de 0,24 Wh/m³. A faixa de aplicação é de 70 m³/h até 270m³/h a 100 Pa. De forma a suprir as necessidades de arrefecimento, foi adotado o uso de ventilação natural noturna durante as estações mais quentes.

De forma comparativa, optou-se também por avaliar o uso de ventilação natural nas soluções *Passive House*, apresentando a mesma solução que as soluções REH. Ainda que não cumpra as exigências para certificação do PHI, o foco deste trabalho está em avaliar as soluções passivas face às exigências NZEB.

4.5 Pontes térmicas lineares

O comprimento de cada tipo de ponte térmica e seu valor de Ψ estão apresentados na Tabela 15.

Tabela 16 - Discriminação das pontes térmicas lineares, segundo exigências do REH.

Tipo de ponte térmica linear	Comp. (m)	Ψ [W/(mK)]
Fachada com cobertura	58,40	0,70
Fachada com pavimentos térreos (exterior)	1,70	0,70
Facha com pavimentos térreos (interior)	7,48	0,70
Fachadas com caixilharia	80,60	0,25
Duas paredes verticais em ângulos saliente	34,80	0,10
Fachada com pavimento sobre o exterior ou espaço não aquecido	35,30	0,55
Fachada com varanda	38,82	0,60
Fachada com pav. intermédio (exterior)	36,21	0,15
Fachada com pav. Intermédio (interior)	7,48	0,15

Para as soluções *Passive House* foi adotado $\Psi = 0,1$ W/(mK) para as pontes térmicas lineares. Esse valor é o limite máximo imposto pelo PHI.

4.6 Sistemas técnicos REH

Neste subcapítulo serão apresentadas os sistemas técnicos escolhidos para as soluções que atendam exclusivamente aos critérios do REH. Os sistemas são genéricos, não apresentando fornecedores, mas com valores compatíveis com a realidade a partir de pesquisas em catálogos.

4.6.1 Coletores solares

Para o edifício na cidade do Porto calculou-se uma produtividade de 546 kWh/m² para os coletores solares térmicos padrão, fornecendo 1.746 kWh anuais para a preparação de AQS. Como solução foram adotados dois coletores solares com abertura de 3,22 m² cada e com um fornecimento anual de 2.335 kWh para a preparação de AQS. Em conjunto foi adotado um reservatório com capacidade para 280 l.

Para o edifício na cidade de Lisboa calculou-se uma produtividade de 604 kWh/m² para os coletores solares térmicos padrão, fornecendo 1.963 kWh anuais para a preparação de AQS. Como solução foram adotados dois coletores solares com abertura de 3,22 m² cada e com um fornecimento anual de 2.481 kWh para a preparação de AQS. Em conjunto foi adotado um reservatório com capacidade para 280 l.

4.6.2 Combinação de sistemas técnicos

Foram avaliados os sistemas atualmente mais utilizados em edifícios novos. Os sistemas técnicos escolhidos foram: caldeira de condensação a gás, caldeira de biomassa, salamandra, bomba de calor e ar condicionado. Os sistemas técnicos estão apresentados com as potências para aquecimento, arrefecimento, preparação de AQS e suas respectivas eficiências para cada uma das funções na Tabela 17.

Tabela 17 - Sistemas técnicos avaliados.

Sistema	Pot _{aq} (kW)	Pot _{arref} (kW)	Pot _{AQS} (kW)	η _{aq}	η _{arref}	η _{AQS}
Caldeira de condensação a gás	24	-	24	1,09	-	0,89
Caldeira de biomassa	24	-	24	0,93	-	0,93
Salamandra	24	-	-	0,90	-	0,90
Bomba de calor ar-água	24,4	23,1	24,4	4,5	5,34	4,5
Ar condicionado multi-split	5	4,5	-	4,35	4,84	-
Esquentador a gás	-	-	20	-	-	0,90

As combinações dos sistemas técnicos, de forma a atender as necessidades da habitação, estão apresentadas na Tabela 18.

Tabela 18 - Combinações dos sistemas técnicos.

Combinações	Aquecimento	Arrefecimento	AQS
ST1	Caldeira a gás	Ar condicionado	Caldeira a gás
ST2	Caldeira de biomassa	Ar condicionado	Caldeira de biomassa
ST3	Salamandra	Ar condicionado	Esquentado a gás
ST4	Bomba de calor	Bomba de calor	Bomba de calor
ST5	Ar condicionado	Ar condicionado	Esquentador a gás

Para as combinações ST1, ST3 e ST5 existe a obrigatoriedade do uso de coletores solares térmicos para a preparação de AQS. O esquentador a gás é usado apenas como apoio aos coletores para complementar as necessidades de aquecimento das águas sanitárias. No caso das combinações ST2 e ST4 há outros componentes que suprem o papel dos coletores de preparação de AQS através de energias renováveis. Por essa razão, optou-se por não utilizar os coletores nessas duas combinações.

4.7 Sistemas técnicos solução *Passive House*

Além do sistema de ventilação com recuperador de calor, foram adotados coletores solares térmicos para a preparação de AQS. Para padronização do cálculo, foram utilizadas as mesmas soluções adotadas pelas soluções que

atendem exclusivamente as exigências do REH para as cidades de Porto e Lisboa.

De forma a suprir as necessidades energéticas restantes para preparação de AQS, arrefecimento e aquecimento foi utilizado um esquentador a gás e um sistema de ar condicionado multi-split. Os sistemas possuem as mesmas características apresentadas na Tabela 16. Essa solução é similar a que foi adotada no modelo do *Passive-On*.

4.8 Balanço energético

4.8.1 Soluções segundo regulamentação portuguesa

Todos os dados apresentados anteriormente foram inseridos na ferramenta do Itecons para o cálculo das necessidades energéticas. A partir dos dados, a ferramenta calculou e forneceu o balanço energético para cada solução construtiva proposta.

Os resultados obtidos para cada uma das soluções propostas para a cidade do Porto estão apresentadas na Tabela 19.

Tabela 19 - Necessidades energéticas para a cidade do Porto para cada solução proposta.

Combinação	ST1	ST2	ST3	ST4	ST5
N_{ic} (kWh/m ² .ano)	32,98	32,98	32,98	32,98	32,98
N_i (kWh/m ² .ano)	45,03	45,03	45,03	45,03	45,03
N_{ic}/N_i	0,73	0,73	0,73	0,73	0,73
N_{vc} (kWh/m ² .ano)	6,37	6,37	6,37	6,37	6,37
N_v (kWh/m ² .ano)	9,13	9,13	9,13	9,13	9,13
Q_{ac} (kWh/ano)	2972	2972	2972	2972	2972
Q_a (kWh/ano)	2972	2972	2972	2972	2972
E_{ren} (kWh/ano)	3461	12221	11624	9179	9119
$E_{ren,ref}$ (kWh/ano)	1775	1775	1775	1775	1775
$E_{ren,c}$ AQS (kWh/ano)	2335	3195	2335	2311	2335
E_{ren} AQS (kWh/ano)	1775	1775	1775	1775	1775
N_{tc} (kWhep/ano)	36,75	3,29	6,24	28,71	25,42
N_t (kWhep/ano)	73,19	73,19	73,19	57,31	55,71
N_{tc}/N_t	0,50	0,04	0,09	0,50	0,46
Classe	A	A+	A+	A	A

É possível observar na Tabela 18 que todas as soluções atendem aos critérios NZEB, obrigatórios para edifícios de habitação a partir de 2021. O regulamento prevê que a razão entre N_{ic} e N_i seja igual ou inferior a 0,75 e que a razão entre N_{tc} e N_t seja igual ou inferior a 0,50. Os balanços energéticos para as soluções apresentadas para Lisboa estão apresentados na Tabela 19.

Tabela 20 - Necessidades energéticas para a cidade de Lisboa para cada solução proposta.

Combinação	ST1	ST2	ST3	ST4	ST5
N_{ic} (kWh/m ² .ano)	25,65	25,65	25,65	25,65	25,65
N_i (kWh/m ² .ano)	36,13	36,13	36,13	36,13	36,13
N_{ic}/N_i	0,71	0,71	0,71	0,71	0,71
N_{vc} (kWh/m ² .ano)	9,75	9,75	9,75	9,75	9,75
N_v (kWh/m ² .ano)	12,22	12,22	12,22	12,22	12,22
Q_{ac} (kWh/ano)	2972	2972	2972	2972	2972
Q_a ((kWh/ano)	2972	2972	2972	2972	2972
E_{ren} (kWh/ano)	4154	11062	10503	8520	8554
$E_{ren,ref}$ (kWh/ano)	1963	1963	1963	1963	1963
$E_{ren,c}$ AQS (kWh/ano)	2431	3195	2431	2311	2431
E_{ren} AQS (kWh/ano)	1963	1963	1963	1963	1963
N_{tc} (kWhep/ano)	31,29	5,03	7,54	26,22	22,47
N_t (kWhep/ano)	65,77	65,77	65,77	52,55	51,74
N_{tc}/N_t	0,48	0,08	0,11	0,50	0,43
Classe	A	A+	A+	A	A

4.8.2 Soluções *Passive House*

Para organizar as soluções *Passive House* para as cidades do Porto e de Lisboa, foram feitas identificações que serão utilizadas no restante deste trabalho. A identificação para cada solução *Passive House* proposta, em função da localização e do uso de ventilação mecânica ou não, está identificada na Tabela 21.

Tabela 21 - Identificação das Soluções Passive House.

Solução	Identificação
Passive House Porto com ventilação mecânica	PHP1
Passive House Porto sem ventilação mecânica	PHP2
Passive House Lisboa com ventilação mecânica	PHL1
Passive House Lisboa sem ventilação mecânica	PHL2

A Tabela 22 apresenta as necessidades energéticas calculadas segundo o REH para todas as soluções *Passive House*.

Tabela 22 - Necessidades energéticas para a cidade do Porto para cada solução proposta.

Combinação	PHP1	PHP2	PHL1	PHL2
N_{ic} (kWh/m ² .ano)	16,46	20,13	17,48	18,38
N_i (kWh/m ² .ano)	46,89	49,08	37,68	37,03
N_{ic}/N_i	0,35	0,41	0,46	0,49
N_{vc} (kWh/m ² .ano)	9,11	9,11	12,07	12,07
N_v (kWh/m ² .ano)	9,13	9,13	12,22	12,22
Q_{ac} (kWh/ano)	2972	2972	2972	2972
Q_a ((kWh/ano)	2972	2972	2972	2972
W_{vm} (kWh/ano)	139,79	0	139,79	0
E_{ren} (kWh/ano)	6768	7399	7564	7719
$E_{ren,ref}$ (kWh/ano)	1775	1775	1963	1963
$E_{ren,c}$ AQS (kWh/ano)	2335	2335	2431	2431
E_{ren} AQS (kWh/ano)	1775	1775	1963	1963
N_{tc} (kWhep/ano)	18,90	19,45	20,55	19,49
N_t (kWhep/ano)	57,07	58,68	52,88	52,40
N_{tc}/N_t	0,33	0,33	0,39	0,37
Classe	A	A	A	A

É possível observar que todas as soluções atendem com folga aos critérios NZEB. As necessidades de aquecimento são significativamente mais baixas, mesmo para Lisboa, onde os valores de U utilizados são similares aos exigidos pelo REH. A grande diferença está no tratamento das pontes térmicas que apresentam valores muito baixos em comparação aos valores fornecidos pelo REH.

4.9 Cálculo PHPP

Com todos os cálculos feitos e todos os dados necessários inseridos no PHPP, a ferramenta gerou o balanço energético para as duas soluções que apresentam ventilação mecânica com recuperação de calor. Como o procedimento de cálculo são diferentes para as duas metodologias, os resultados variam de acordo com os dados fornecidos. Os dados finais fornecidos para a região do Porto estão apresentados na Figura 24.

Specific building characteristics with reference to the treated floor area				Alternative criteria		Fulfilled? ²
			Criteria	Alternative criteria		
Space heating	Treated floor area m ²	214,8		15	-	yes
	Heating demand kWh/(m ² a)	5	≤	-	10	
	Heating load W/m ²	7	≤	-	-	
Space cooling	Cooling & dehum. demand kWh/(m ² a)	-	≤	-	-	-
	Cooling load W/m ²	-	≤	-	-	
	Frequency of overheating (> 25 °C) %	0	≤	10	-	yes
	Frequency of excessively high humidity (> 12 g/kg) %	2	≤	20	-	yes
Airtightness	Pressurization test result n ₅₀ 1/h	0,6	≤	0,6	-	yes
Non-renewable Primary Energy (PE)	PE demand kWh/(m ² a)	65	≤	120	-	yes
Primary Energy Renewable (PER)	PER demand kWh/(m ² a)	56	≤	-	-	-
	Generation of renewable energy (in relation to projected building footprint area) kWh/(m ² a)	5	≥	-	-	-

² Empty field: Data missing; '-': No requirement

Figura 24 - Resultados fornecidos pelo PHPP para a Solução Passive House na Região do Porto.

Para a região de Lisboa os resultados fornecidos pelo PHPP estão apresentados na Figura 25.

Specific building characteristics with reference to the treated floor area				Alternative criteria		Fulfilled? ²
			Criteria	Alternative criteria		
Space heating	Treated floor area m ²	214,8		15	-	yes
	Heating demand kWh/(m ² a)	11	≤	-	10	
	Heating load W/m ²	9	≤	-	-	
Space cooling	Cooling & dehum. demand kWh/(m ² a)	-	≤	-	-	-
	Cooling load W/m ²	-	≤	-	-	
	Frequency of overheating (> 25 °C) %	0	≤	10	-	yes
	Frequency of excessively high humidity (> 12 g/kg) %	0	≤	20	-	yes
Airtightness	Pressurization test result n ₅₀ 1/h	0,6	≤	0,6	-	yes
Non-renewable Primary Energy (PE)	PE demand kWh/(m ² a)	66	≤	120	-	yes
Primary Energy Renewable (PER)	PER demand kWh/(m ² a)	59	≤	-	-	-
	Generation of renewable energy (in relation to projected building footprint area) kWh/(m ² a)	6	≥	-	-	-

² Empty field: Data missing; '-': No requirement

Figura 25 - Resultados fornecidos pelo PHPP para a Solução Passive House na Região de Lisboa.

4.10 Análise financeira

4.10.1 Fatura Energética

A partir das necessidades energéticas obtidas e dos sistemas técnicos selecionados foi possível estimar o valor da fatura energética anual para cada solução proposta. Os valores das faturas energéticas anuais para as cidades do Porto e de Lisboa estão apresentados na Tabela 23.

Tabela 23 - Fatura energética anual climatização e preparação de AQS para as soluções que seguem unicamente a regulamentação portuguesa.

Cidade	Porto (€)	Lisboa (€)
ST1	720,84	602,74
ST2	604,60	543,24
ST3	517,07	443,88
ST4	434,98	397,25
ST5	404,12	353,64

Para as soluções *Passive House* os valores das necessidades energéticas estão informadas na Tabela 24.

Tabela 24 - Fatura Energética para as soluções Passive House.

Solução	PHP1	PHP2	PHL1	PHL2
Fatura (€)	301,98	310,20	324,49	308,56

4.10.2 Custos de investimento

Os valores utilizados aqui foram buscados através do site Gerador de Preços (2019), por fornecedores e por lojas especializadas. O custo total de investimento (soma do preço do equipamento, mão de obra, emissores de calor e central de gás, caso necessário) para todos os sistemas técnicos escolhidos estão apresentados na Tabela 25.

Tabela 25 - Custo de investimento para as soluções que atendem as exigências do REH.

Sistema Técnico	Custo de investimento (€)
Caldeira de condensação a gás	5.000,00
Caldeira de biomassa	6.500,00
Salamandra	4.000,00
Bomba de calor ar-água	14.000,00
Ar condicionado	7.500,00
Esquentador a gás	500,00
Coletores térmicos	3.000,00

Os valores para janelas, portas e sistema de ventilação foram encontrados através de pessoas experientes em projetos *Passive House*. Os custos de investimento para as Soluções *Passive House* estão detalhados na Tabela 26.

Tabela 26 - Custos relativos às soluções *Passive House*.

Cidade	Isolamento e estanqueidade (€)	Janelas e portas (€)	Sistema de ventilação (€)
Porto	7.000,00	1.500,00	8.000,00
Lisboa	1.000,00	1.500,00	8.000,00

Esse custo de investimento detalhados na Tabela 26 se referem as diferenças entre as soluções. Uma vez que o projeto da habitação é comum, é necessário apenas calcular o investimento do que diferente entre as soluções, como mudança de caixilharia e aumento do isolamento.

O valor de certificação *Passive House* é mais elevado do que o valor encontrado para certificação nacional. Para o edifício de estudo o valor aproximado para certificação e pré-certificação é de 300,00 € cada, incluso o IVA e a taxa da ADENE. Sendo assim, para um edifício novo o custo total de certificação é de 600,00 €. O custo para a certificação *Passive House* é de aproximadamente 2.399,00 €. Neste valor encontra-se incluído também o valor do *Blower Door Test*.

Os custos de investimento total para cada solução estão apresentados na Tabela 27.

Tabela 27 - Custo de investimento total para as soluções.

Solução	Custo de Investimento Total (€)
ST1	16.100,00
ST2	14.600,00
ST3	15.600,00
ST4	13.600,00
ST5	12.600,00
PHP1	29.899,00
PHP2	21.899,00
PHL1	23.899,00
PHL2	15.899,00

Os valores apresentados na Tabela 27 se referem a soma dos custos de todos os sistemas técnicos utilizados (equipamento, mão de obra e emissores de calor), os custos de certificação e, no caso das soluções *Passive House*, os custos das melhorias apresentadas na envolvente apresentados na Tabela 26.

4.10.3 Tempo de retorno

O cálculo do *Payback* Simples e do Descontado para a cidade do Porto está apresentado na Tabela 28.

Tabela 28 - Cálculo do *Payback* para as soluções apresentadas para a cidade do Porto.

Solução	Comparação	CI	Poupança Energética (€)	PS (anos)	PD (anos)
PHP1	ST1	13.799,00	418,86	32,94	+50
PHP1	ST2	15.299,00	302,62	+50	+50
PHP1	ST3	14.299,00	215,09	+50	+50
PHP1	ST4	16.299,00	133,00	+50	+50
PHP1	ST5	17.299,00	102,14	+50	+50
PHP2	ST1	5.799,00	410,64	14,12	16,76
PHP2	ST2	7.299,00	294,40	24,79	34,59
PHP2	ST3	6.299,00	206,87	30,45	47,42
PHP2	ST4	8.299,00	124,78	+50	+50
PHP2	ST5	9.299,00	93,92	+50	+50

O cálculo do *Payback* simples e do descontado comparou as soluções que atendem unicamente ao REH com as soluções *Passive House* para cada cidade. O Custo de Investimento (CI) utilizado é a diferença entre o custo de investimento total, sistemas técnicos mais certificação, da solução *Passive House* com a outra solução comparada.

O cálculo do *Payback* Simples e do Descontado para a cidade de Lisboa está apresentado na Tabela 29.

Tabela 29 - Cálculo do *Payback* para as soluções apresentadas para a cidade de Lisboa.

Solução	Comparação	CI	Poupança Energética (€)	PS (anos)	PD (anos)
PHL1	ST1	7.799,00	278,25	28,02	41,53
PHL1	ST2	9.299,00	218,75	42,51	+50
PHL1	ST3	8.299,00	119,39	+50	+50
PHL1	ST4	10.299,00	72,76	+50	+50
PHL1	ST5	11.299,00	29,15	+50	+50
PHL2	ST1	-201,00	294,18	0	0
PHL2	ST2	1.299,00	234,68	5,53	5,93
PHL2	ST3	299,00	135,32	2,21	2,28
PHL2	ST4	2.299,00	88,69	25,92	36,90
PHL2	ST5	3.299,00	45,08	+50	+50

5 CONCLUSÃO

Para atender aos critérios NZEB, obrigatórios para todos os edifícios novos a partir de 2021, as soluções *Passive House* se mostraram muito eficientes apresentando necessidades para aquecimento muito baixas. Cabe ressaltar que essas soluções também propiciam ao morador um conforto térmico interior elevado e uma qualidade do ar interior assegurada em relação as soluções correntes apresentadas em Portugal. Outro ponto positivo é a obrigatoriedade do *Blower door test* para *Passive Houses*, garantindo que os critérios de estanqueidade foram atendidos na prática.

Os estudos realizados para *Passive Houses* em Lisboa apontam valores de U para a envolvente muito similares aos exigidos pela legislação portuguesa. A grande diferença entre as soluções está no sistema de ventilação mecânica, no tratamento de pontes térmicas e nos pormenores da execução de *Passive House*. Além disso, é obrigatório o acompanhamento em obra por peritos certificados, fator que assegura a correta execução e o cumprimento dos valores calculados em projeto.

Sendo assim, a comparação feita aqui são com soluções propostas para atender aos critérios NZEB, não com a legislação portuguesa atual. Dessa forma, as poupanças energéticas das soluções *Passive Houses* não se mostram tão elevadas como seria de se esperar. Tanto as soluções correntes para atender às exigências NZEB quanto as soluções *Passive House* apresentam necessidades muito baixas de energia. Por esse motivo, os tempos de retorno calculados se tornaram muito altos para a maioria das comparações.

Para diminuir as necessidades de arrefecimento, os estudos para *Passive Houses* em Lisboa e no Porto, sugerem o uso da ventilação noturna através da abertura de janelas. Algo que pode ser benéfico devido à cultura do povo português na abertura de janelas. Ainda assim, seria interessante estudar o uso exclusivo de ventilação natural em *Passive House* em Portugal, uma vez que a legislação portuguesa preferencia esse tipo de ventilação e que o sistema de ventilação mecânica apresenta um custo elevado de investimento.

Para a realização da pesquisa houve uma grande dificuldade para obtenção de soluções e de orçamentos relativos a componentes certificados. Em

Portugal, devido à pouca divulgação e poucas construções certificadas a dificuldade é ainda maior.

Apesar de tudo isso, ainda é um campo que tem muito a evoluir, podendo futuramente apresentar soluções construtivas mais baratas e para todas as zonas térmicas localizadas em Portugal.

5.1 Trabalhos futuros

Para soluções e temas não abordados nesta Dissertação, são sugeridas as seguintes propostas para trabalhos futuros:

- Realizar estudos com a utilização de parâmetros para outras cidades em Portugal que estejam inseridas nas demais zonas térmicas;
- Estudar alternativas à ventilação mecânica para *Passive Houses* em Portugal.

6 REFERÊNCIAS

ADENE. SCE – Sistema de Certificação energética - *Técnicos SCE*. [Em linha]. (2019). [Consult. 07 Mar. 2019]. Disponível em WWW: <<https://www.sce.pt/certificacao-energetica-de-edificios/profissionais-sce/>>.

ADENE. SCE – Sistema de Certificação energética - *Maior Conforto e Benefícios Económicos em casa: Guia de utilização do Certificado Energético*. [Em linha]. (2018). [Consult. 21 Jun. 2019]. Disponível em: <https://www.sce.pt/wp-content/uploads/2018/07/afM_Triptico_beneficios_ce.pdf>.

ADENE; LNEC - *Sistemas de Ventilação: 10 Soluções Eficiência Energética*, 2016.

ASSOCIAÇÃO PASSIVHAUS PORTUGAL (PHPT) – *A primeira Passive House em Portugal*. [Em linha]. (2013). [Consult. 03 Abr. 2019]. Disponível em: <http://passivhaus.pt/projetos/anexos/2%20-%20homegrid_ruadomar.pdf>.

ASSOCIAÇÃO PASSIVHAUS PORTUGAL (PHPT) – *Determinação da permeabilidade ao ar em edifícios: Método da porta ventilada*. [Em linha]. (2018). [Consult. 08 Abr. 2019]. Disponível em: <http://passivhaus.pt/solucoes/anexos/Blowerdoor_site.pdf>.

ASSOCIAÇÃO PASSIVHAUS PORTUGAL (PHPT) – *Quem somos?*. [Em linha]. (2019). [Consult. 16 Mar. 2019]. Disponível em: <<http://passivhaus.pt/sobre?m=2>>.

ASSOCIAÇÃO PORTUGUESA DOS FABRICANTES DE ARGAMASSAS E ETICS (APFAC) – *Manual de aplicação ETICS*. [Em linha]. (2015). [Consult. 10 Abr. 2019]. Disponível em: <<https://www.apfac.pt/uploads/documentos/apfac-manual-de-aplicacao-etics-2015-lq.pdf>>.

ATD-RM - *Caldeiras de condensação*. [Em linha]. (2015). [Consult. 28 Maio 2019]. Disponível em: <<https://atd-rm.pt/content/187-o-que-e-uma-caldeira-de-condensacao>>.

BADESCU, Viorel; SICRE, Benoit - *Renewable energy for passive house heating. Part I building description*. Energy and Buildings. 35 (2003): 1077–1084.

CONFERÊNCIA DAS NAÇÕES UNIDAS SOBRE O MEIO AMBIENTE E DESENVOLVIMENTO (1992: Rio de Janeiro, RJ) - *Conferência das Nações Unidas sobre o Meio Ambiente e Desenvolvimento: de acordo com a Resolução n. 44/228 da Assembleia Geral da ONU, de 22-12-89, estabelece uma abordagem equilibrada e integrada das questões relativas a meio ambiente e desenvolvimento: a Agenda 21*. Câmara dos Deputados, Coordenação de Publicações, 1995.

CORTEZ, Luís Augusto B.; LORA, Edurado Silva; GÓMEZ, Edgardo Olivares - *Biomassa para energia*. Campinas, SP: Editora da Unicamp, 2008. ISBN 978-85-268-0783-9.

DEPARTAMENTO DE ALTERAÇÕES CLIMÁTICAS (DCLIMA) - *Inventário Nacional de Emissões Atmosféricas (NIR 2014 – emissões 2012)* - Memorando sobre emissões de CO₂e elaborado com base na submissão oficial para a CE (Dec. 280/2004/CE). [Em linha]. (2014). [Consult. 22 Mar. 2019]. Disponível em: <http://www.apambiente.pt/_zdata/DPAAC/INERPA/memo_emisses_PT_20140508.pdf>.

DECRETO LEI n.º 28/2016. *D.R. I Série. 119 (16-06-23) 1946*.

DESPACHO (EXTRATO) n.º 15793-F/2013. *D.R I Série. 234 (13-12-03) 35088*.

DESPACHO (EXTRATO) n.º 15793-K/2013. *D.R I Série. 234 (13-12-03) 35088*.

DIREÇÃO-GERAL DE ENERGIA E GEOLOGIA (DGEG) - *Energia em Portugal*, 2018.

DIRECTIVA 2010/31/UE do Parlamento Europeu e do Conselho. *Jornal Oficial da União Europeia* (10-05-19).

ENERGY SAVER – *Blower door test*. [Em linha]. (2019). [Consult. 08 Abr. 2019]. Disponível em: <<https://www.energy.gov/energysaver/blower-door-tests>>.

FEIST, Wolfgang; SCHNIEDERS, Jürgen; DORER, Viktor; HAAS, Anne - *Re-inventing air heating: convenient and comfortable within the frame of the Passive House concept*. *Energy and Buildings*. 37 (2005): 1186–1203.

GERADOR DE PREÇOS. Gerador de preços para a construção civil. [Em linha]. (2019). [Consult. 30 Maio 2019]. Disponível em: <<http://www.geradordeprecos.info/>>.

HINES, Jonathan et al. – *How to Build a Passivhaus: Rules of Thumb*. Passivhaus Trust, 2015.

HOMEGRID – *Rua do Mar – Moradia B*. [Em linha]. (2016). [Consult. 03 Abr. 2019]. Disponível em: <<http://www.homegrid.pt/galerias.aspx?action=all&id=2&menu=Portf%C3%B3lio>>.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY [IEA] - *Capturing the Multiple Benefits of Energy Efficiency*. Paris: IEA/OECD, 2014.

KNAUF – *Fachada ligera Passivhaus*. [Em linha]. (2019). [Consult. 30 Maio 2019]. Disponível em: <<https://www.knauf.pt/sistemas/fachada/fachada-ligera-passivhaus.html>>.

LAUSTEN, Jens - *Energy Efficiency Requirements in Building Codes, Energy Efficiency Policies for New Buildings*. Suécia: IEA Information Paper, 2008.

MARCELINO, João; GAVIÃO, João – *A construção das primeiras Passive House em Portugal (Ílhavo): O caminho para a autonomia de elevado nível*. In: CONGRESSO LIDERA, Lisboa, 2012. [Em linha]. [Consult. 03 Abr. 2019]. Disponível em: http://www.lidera.info/resources/Apresentacao_Homegrid_Congresso_LiderA_2012.pdf?phpMyAdmin=77d31a787ce126bb305b5b4b9dcec31c.

PARLAMENTO EUROPEU - *Emissões de gases com efeito de estufa por país e setor (Infografia)*. [Em linha]. (2018). [Consult. 22 Mar. 2019]. Disponível em: <http://www.europarl.europa.eu/news/pt/headlines/society/20180301STO98928/emissoes-de-gases-com-efeito-de-estufa-por-pais-e-setor-infografia>.

PASSIPEDIA. The Passive House resource. [Em linha]. (2019). [Consult. 03 Jun. 2019]. Disponível em: <http://www.passipedia.org/>.

PASSIVE HOUSE BUILDINGS. Passive House database. [Em linha]. [2019]. [Consult. 07 Abr. 2019]. Disponível em: https://passivehouse-database.org/index.php?lang=en#d_2402.

PASSIVE HOUSE INSTITUTE – *Superior energy efficiency in buildings*. [Em linha]. (2019). [Consult. 16 Mar. 2019]. Disponível em: https://passivehouse.com/01_passivehouseinstitute/01_passivehouseinstitute.htm.

Passive-On – *A norma Passivhaus em climas quentes da Europa: Directrizes de projecto para casa confortáveis de baixo consumo energético*. [Em linha]. (2007). [Consult. 15 Jun. 2019]. Disponível em: <http://www.eerg.it/passive-on.org/pt/>.

PEREIRA, Micael A. F. - *Edifícios com necessidades energéticas quase nulas: Análise da viabilidade técnica-económica da sua implementação em Portugal*. Minho: Escola de Engenharia - Universidade do Minho, 2013. Dissertação de Mestrado.

PORTARIA n.º 349-B/2013. *D.R I Série. 232 (13-11-29) 6624*.

PORTARIA n.º 379-A/2015. *D.R I Série. 207 (15-10-22) 9196.*

PORTARIA n.º 319/2016. *D.R I Série. 239 (16-12-15) 4723.*

PORTARIA n.º 98/2019. *D.R I Série. 65 (19-04-02) 1816.*

SACHS, Ignacy - *Estratégias de transição para o século XXI: desenvolvimento e meio ambiente*. São Paulo: Studio Nobel/Fundap, 1993.

SANTOS, Carlos A. P. dos; MATIAS, Luís - *ITE 50-Coefficientes de transmissão térmica de elementos da envolvente dos edifícios*. Lisboa: Laboratório Nacional, 2006.

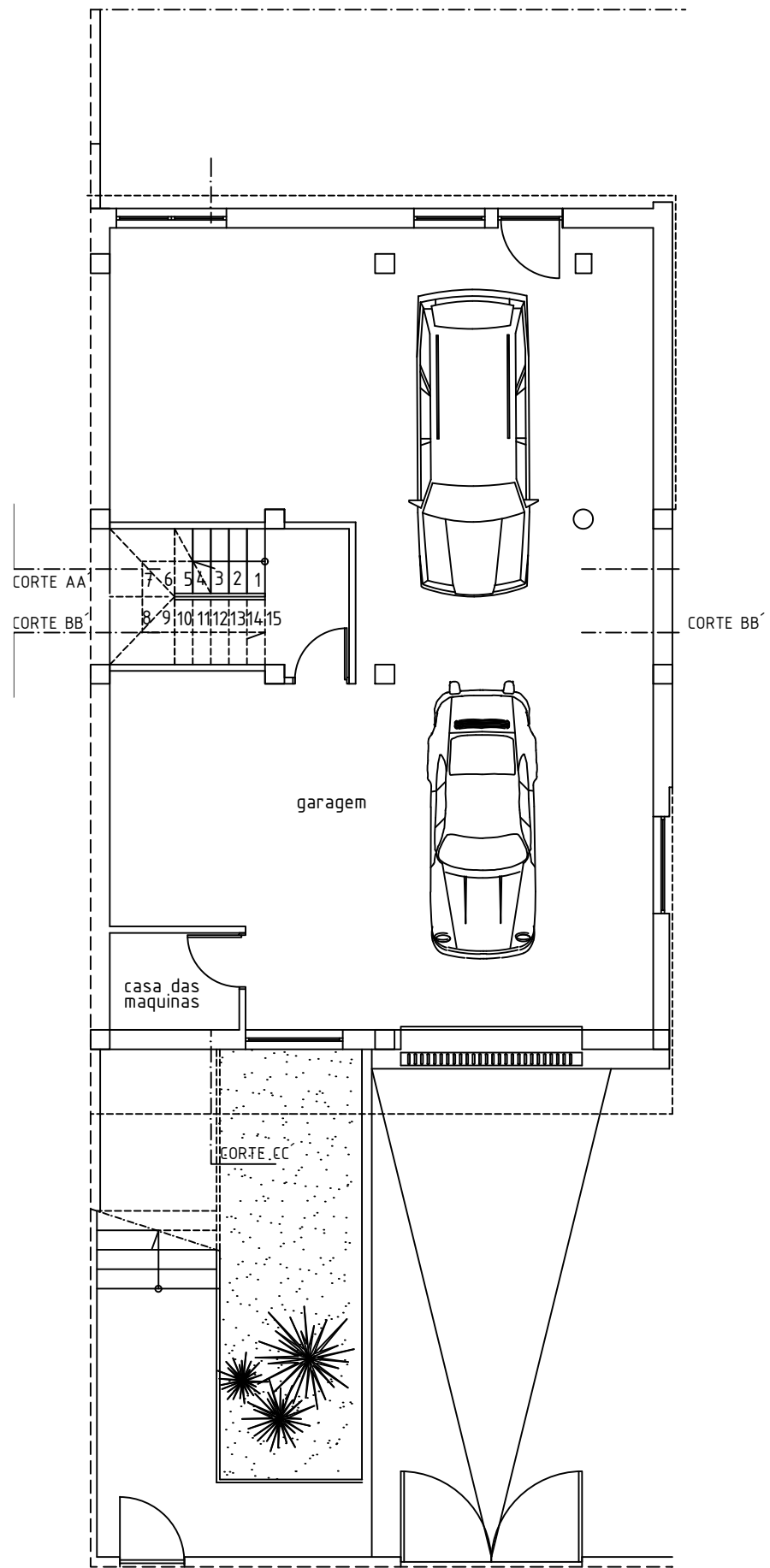
SARTORI, Igor; HESTNES, Anne Grete - *Energy use in the life cycle of conventional and low-energy buildings: a review article*. **Energy and Buildings**. 39 (2007): 249–257.

SCHNIEDERS, Jürgen - *Passive House in South West Europe*. 2ª Ed. Darmstadt: Passivhaus Institut, 2009.

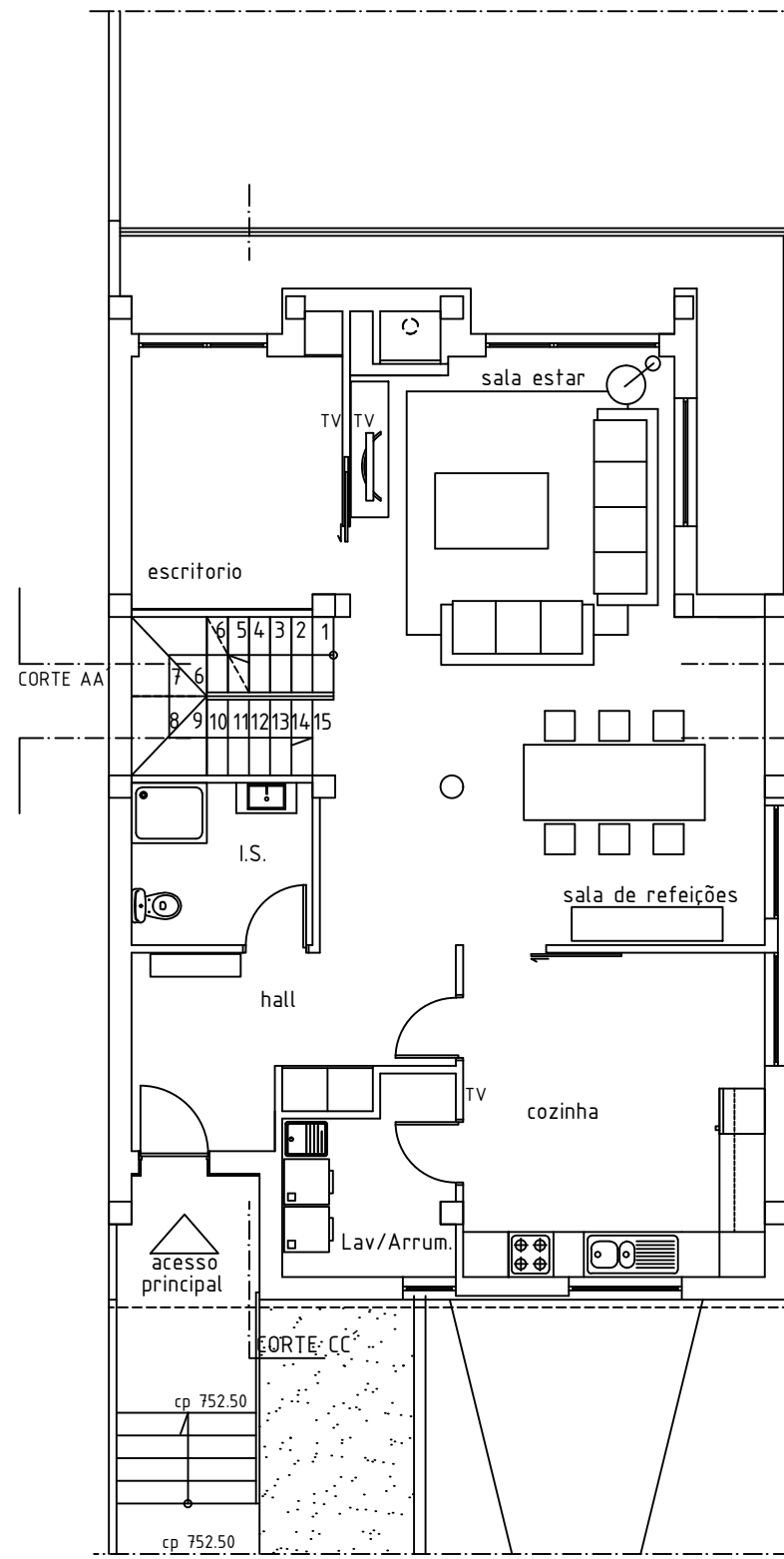
SEYE, Omar - *Análise de ciclo de vida aplicada ao processo produtivo de cerâmica estrutural tendo como insumo energético capim elefante (*Pennisetum purpureum* Schaum)*. Campinas: Faculdade de Engenharia Mecânica - Universidade Estadual de Campinas, 2003. Tese de Doutorado.

VISSMANN – *Bombas de calor*. [Em linha]. (2019). [Consult. 28 Maio 2019]. Disponível em: <<https://www.viessmann.pt/pt/residencial/que-sistema-de-aquecimento-escolher/bombas-de-calor.html>>.

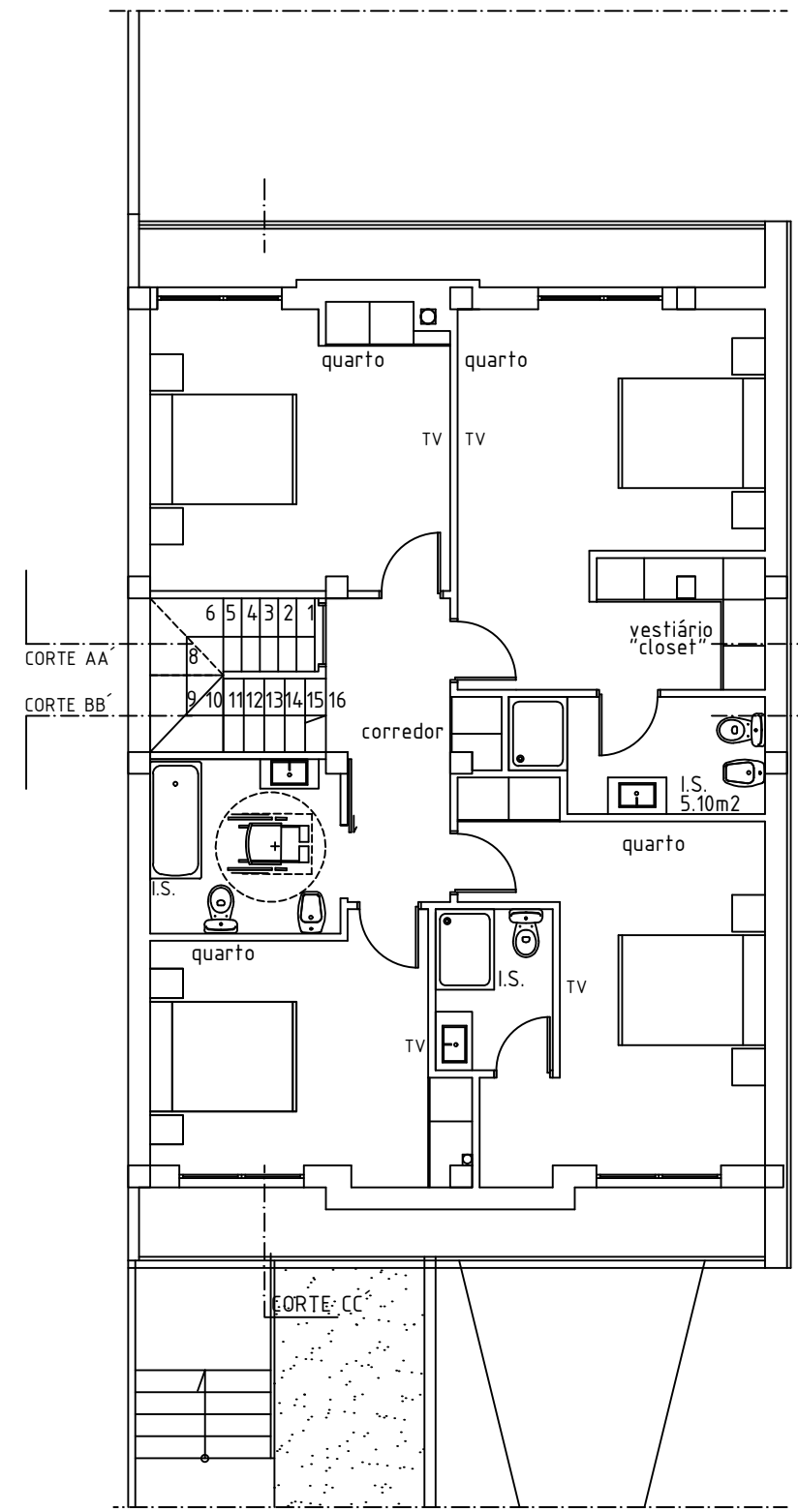
ANEXOS



PLANTA DA CAVE

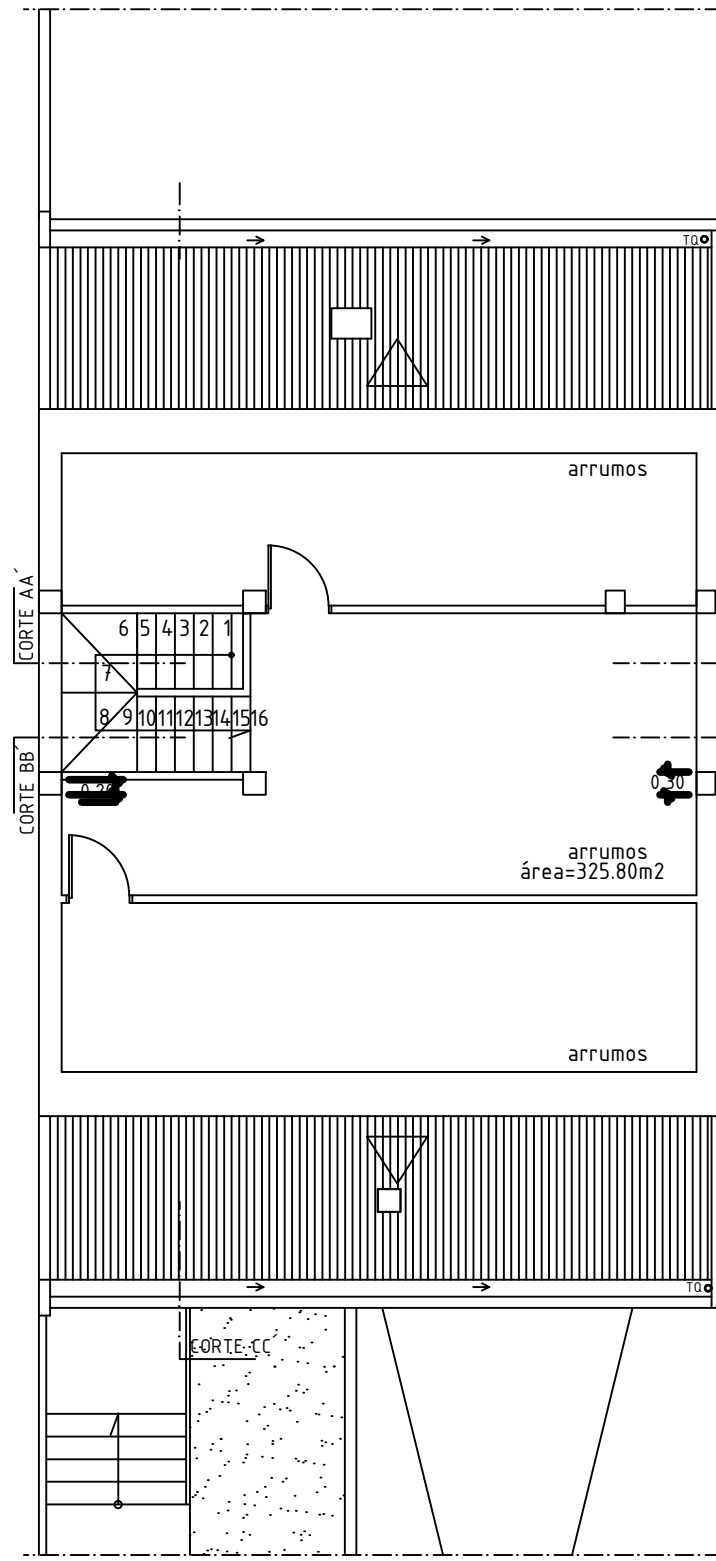


PLANTA DO R/CHÃO

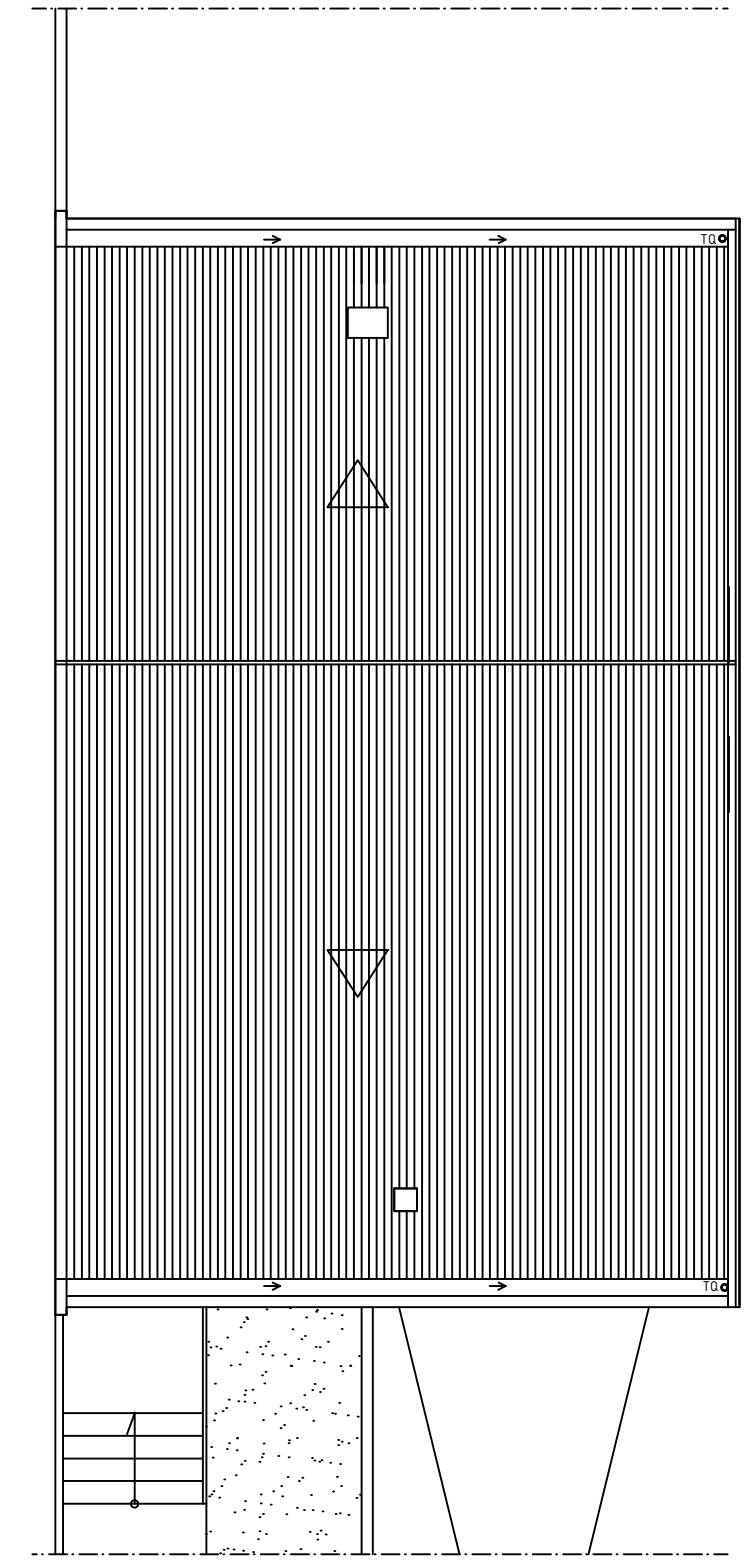


PLANTA DO PISO 1

escala 1/100

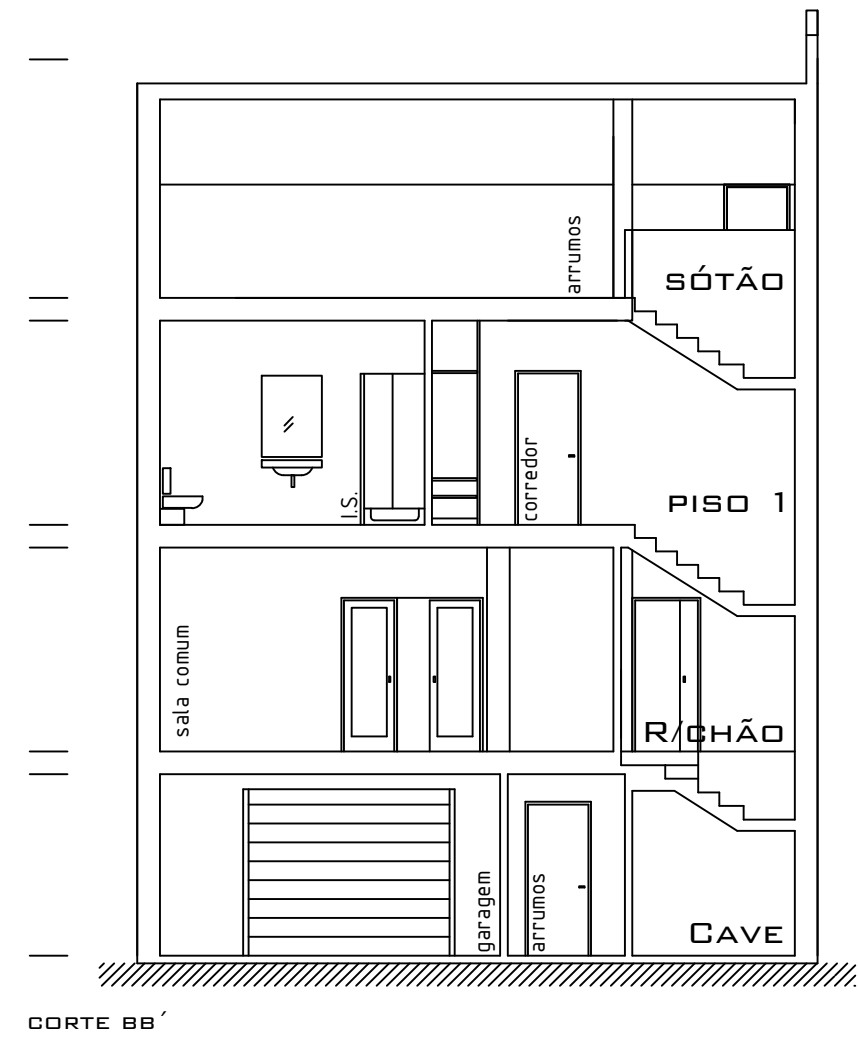
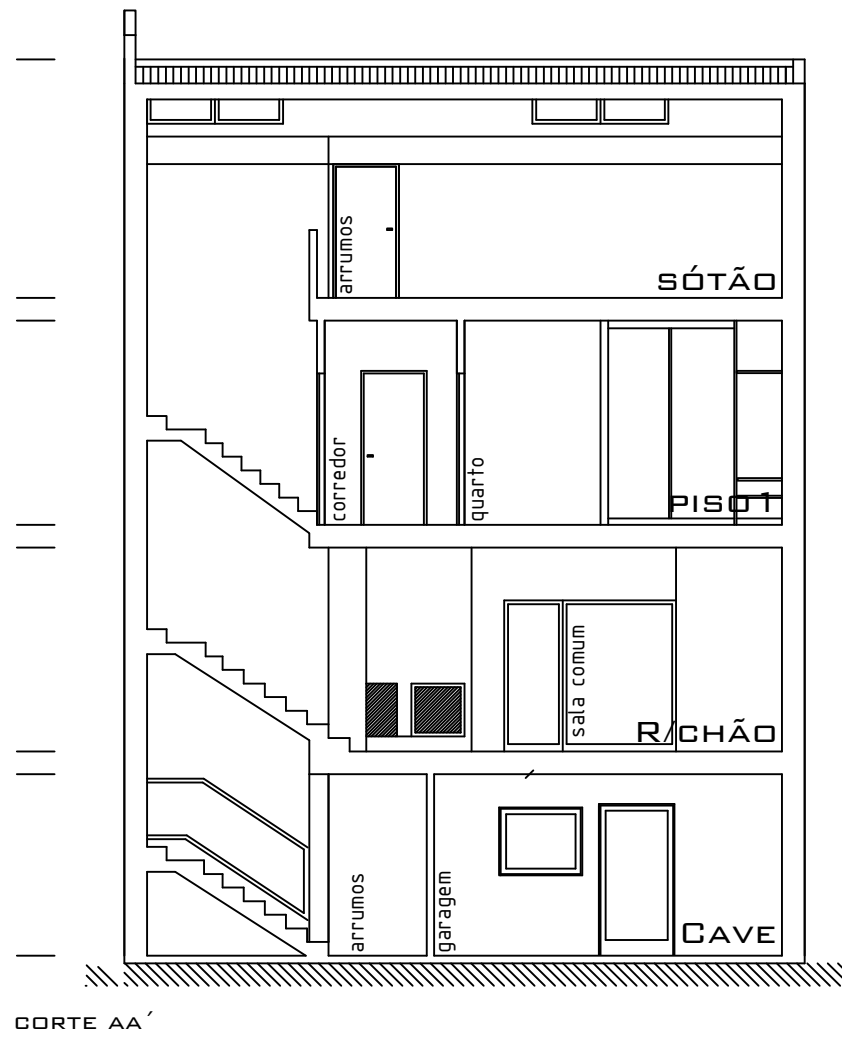


PLANTA DO SOTÃO

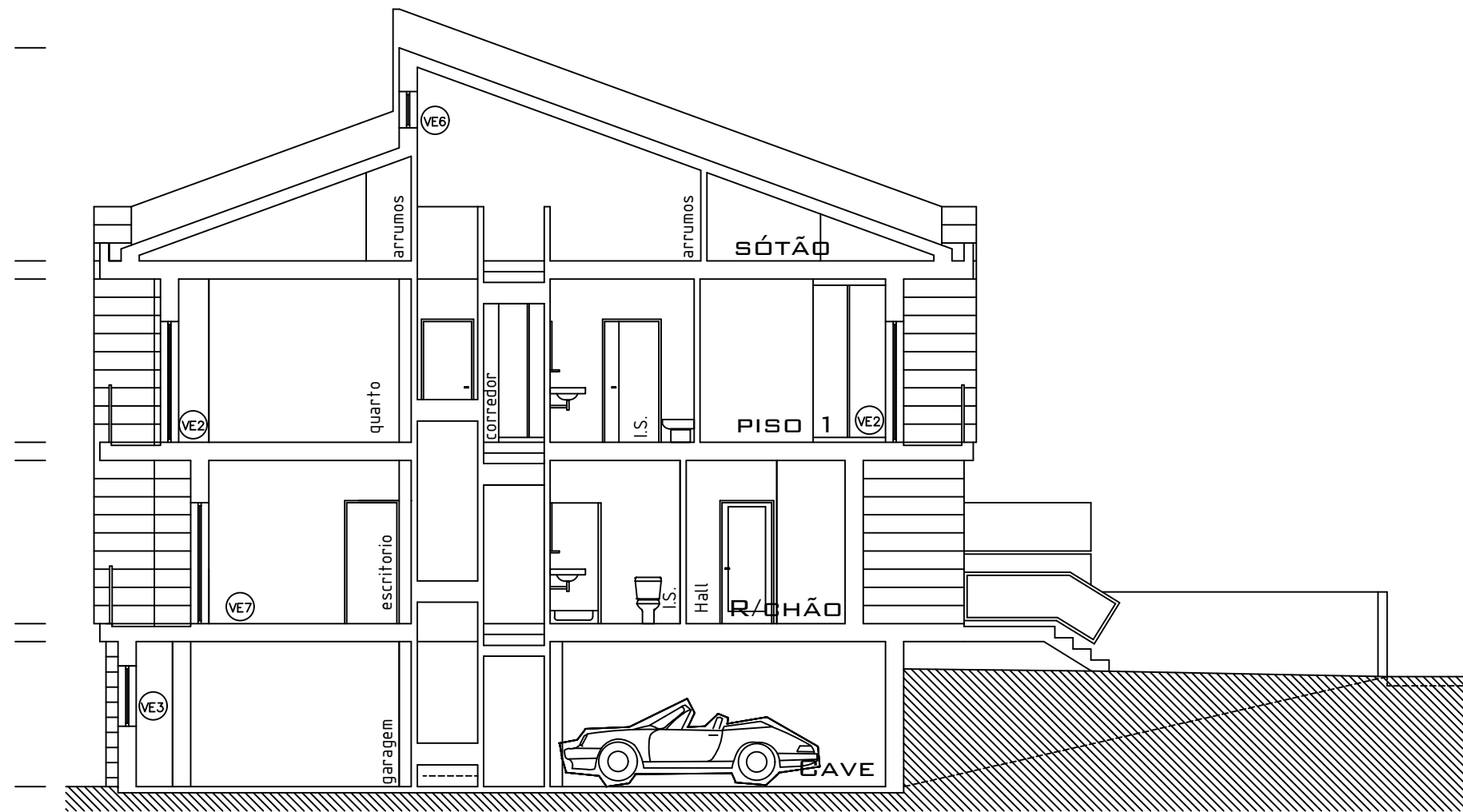


PLANTA DA COBERTURA

escala 1/100

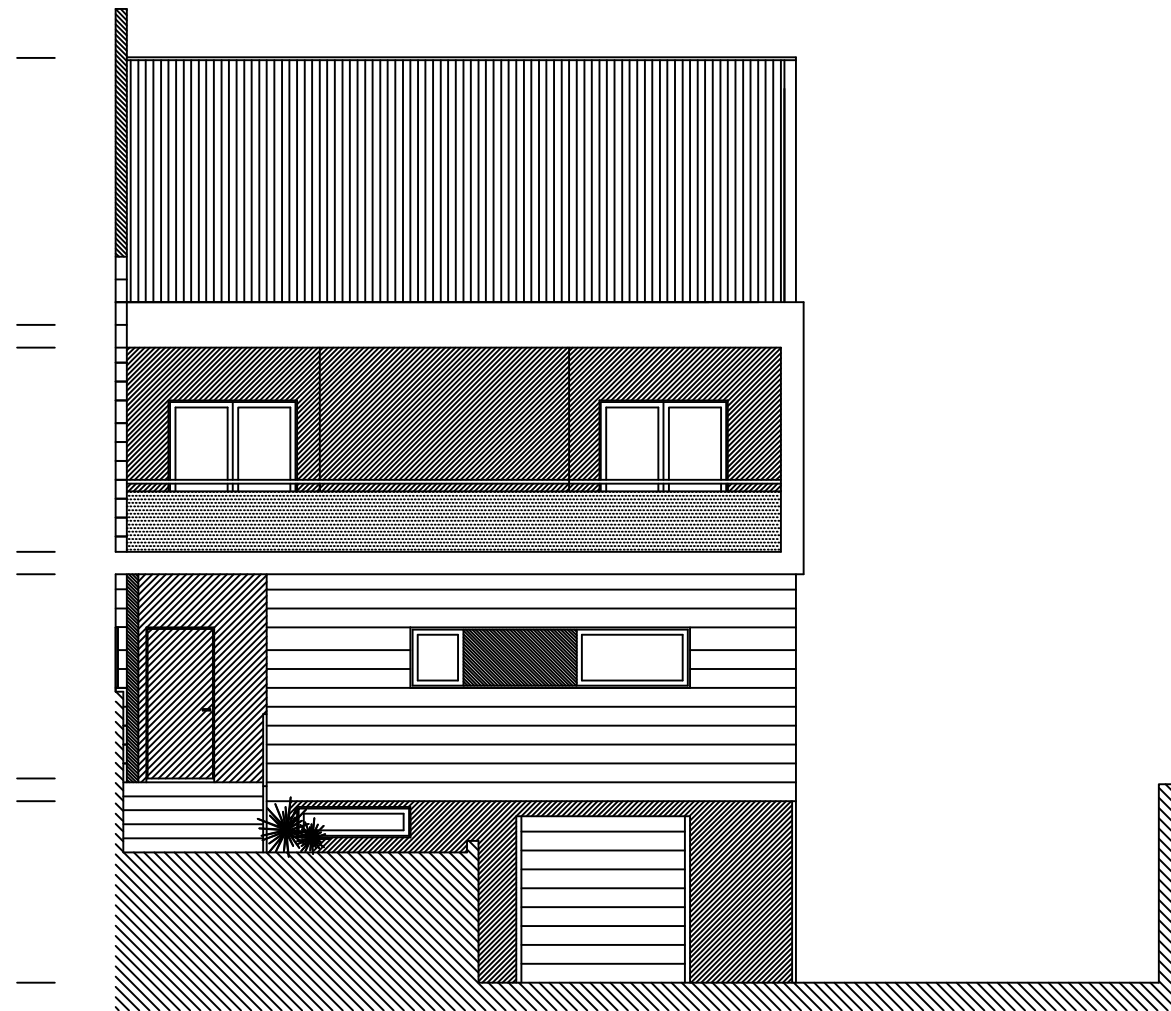


escala 1/100

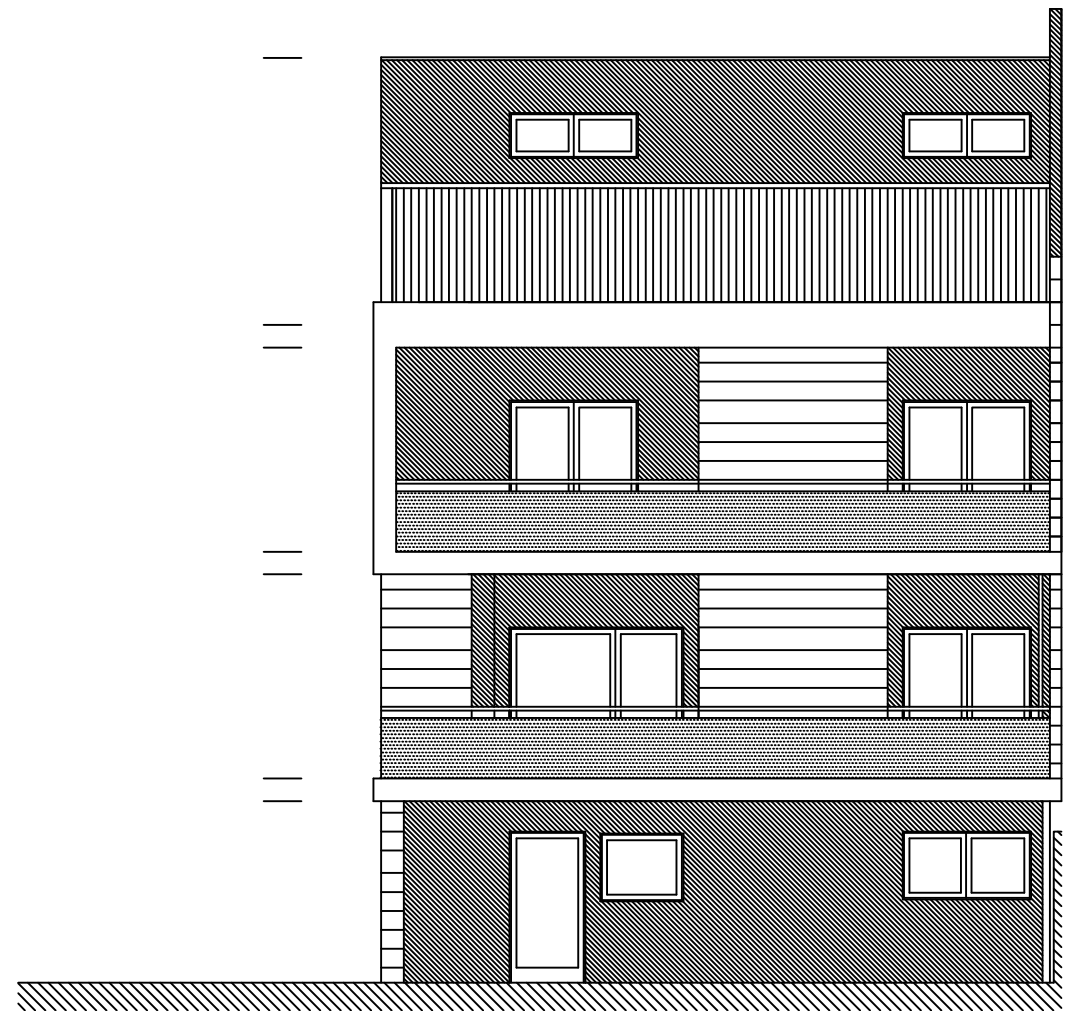


CORTE CC'

escala 1/100



ALÇADO PRINCIPAL



ALÇADO POSTERIOR

escala 1/100