

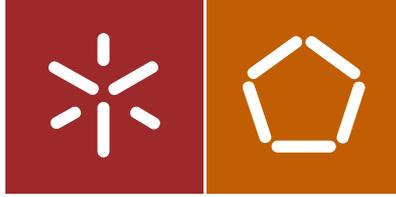


Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Célia Carolina de Queiroz Miranda

Análise do desempenho termo-energético e do impacto de ciclo de vida de um edifício Earthship – comparação com o sistema construtivo convencional

Célia Carolina de Queiroz Miranda | Análise do desempenho termo-energético e do impacto de ciclo de vida de um edifício Earthship – comparação com o sistema construtivo convencional



Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Célia Carolina de Queiroz Miranda

Análise do desempenho termo-energético
e do impacte de ciclo de vida de um
edifício Earthship – comparação com
o sistema construtivo convencional

Dissertação de Mestrado
Ciclo de Estudos Integrados Conducentes ao
Grau de Mestre em Engenharia Civil

Trabalho efetuado sob a orientação do
Professor Doutor Ricardo Filipe Mesquita Mateus

AGRADECIMENTOS

E assim, num ápice, se passaram 5 anos. Cinco anos de alegrias, desilusões e batalhas incansáveis que chegam agora ao fim. Experiências que levo comigo para a vida toda, assim como aqueles que me foram importantes ao longo desta jornada. Como tal, não posso deixar de expressar a minha profunda gratidão e reconhecimento:

Ao Professor Doutor Ricardo Mateus, pela orientação, por todas as horas disponibilizadas e pela compreensão quando nem tudo corria como planeado. Pela sabedoria que me transmitiu e que em tanto me acrescentou. Por me aconselhar, incentivar e direcionar até ao fim desta caminhada.

Ao Engenheiro Mário Roriz da *Earthship Biotechture Portugal* por todo o conhecimento transmitido e apoio incansável, que foram o grande marco e ponto de partida para o desenrolar de toda esta dissertação. Por me aconselhar e encorajar a concluir esta etapa agarrando o desconhecido e assumindo os riscos a ele associados.

À minha família. Em especial aos meus pais, por todo o esforço que fizeram para me dar esta oportunidade e terem plantado em mim o amor que me formou como sou. Por terem torcido por mim e acreditado quando nem eu achava possível. Devo também agradecer à minha pastorinha, Maya, por me acompanhar atentamente pela janela enquanto eu redigia esta dissertação- é sempre bom um apoio psicológico de quatro patas.

Ao Bruno, por todo o amor e apoio incondicional. Por me mostrares que a vida tem sempre um lado bom, e principalmente, por me fazeres feliz. Por seres quem és e quem eu quero que sejas sempre. E também por me ajudar quando o meu computador não colaborava!

Às minhas queridas amigas, as minhas *Babes* por todos os momentos que partilhamos. Por todas as noites sem dormir, pelos mais diversos motivos, pelo companheirismo, pelos conselhos, pela ajuda, pelas horas de estudo e trabalho, por tudo. São vocês que eu levo para a vida e sem vocês não tinha aqui chegado.

Agradeço também em especial às minhas queridas amigas: Sandra, por ter a paciência de rever os aspetos teóricos desta dissertação, e Daniela, por me atender o telemóvel 10 vezes ao dia para tirar dúvidas.

Aos amigos de sempre, pela amizade, pelo apoio e pela paciência. Pela conquistas e celebrações em conjunto. Que a perseverança nos mantenha unidos, mesmo quando tudo parece perdido, pois sem amizade a vida não tem a mesma cor.

Ao Professor Doutor Dinis Leitão por todo o apoio e disponibilidade para o esclarecimento de dúvidas.

A todo o Departamento de Engenharia Civil da Universidade do Minho pelo acompanhamento prestado e disponibilidade ao longo do meu percurso académico.

RESUMO

As crescentes preocupações com o meio ambiente levam à procura constante por medidas de sustentabilidade no âmbito dos mais variados setores e o da Engenharia Civil não é exceção.

Como forma de reduzir os potenciais impactes ambientais da construção, surge a possibilidade de se integrarem materiais reciclados na construção, dando-lhes uma nova função bem distinta daquela que normalmente têm. O *Earthship* é o conceito fundado pelo arquiteto americano Michael Reynolds que apresenta um conceito arquitetónico de integração de resíduos, como pneus, latas e garrafas de vidro, em soluções construtivas, fechando assim o ciclo dos materiais, e formando edifícios de habitação que cumprem as funcionalidades convencionais e apresentam simultaneamente reduzidos impactes ambientais.

O conceito baseia-se na ideologia de autossuficiência, tirando proveito do que a natureza tem para oferecer de uma forma sustentável, essencialmente através da utilização de fontes de energia renováveis, que lhe conferem autonomia do meio, possibilitando assim a povoação de locais remotos aparentemente inabitáveis.

Assim, no âmbito desta dissertação, foi alvo de análise o desempenho termo-energético de um edifício onde foi adotado o conceito *Earthship*, através da avaliação do seu enquadramento e validação na legislação portuguesa, do seu desempenho ambiental, funcional e económico. O desempenho deste caso de estudo foi posteriormente comparado a um edifício convencional, construído recorrendo às soluções construtivas normalmente aplicadas em Portugal.

Através da análise de ciclo de vida de ambos os casos de estudo, irá perceber-se que este é um conceito viável na indústria da construção civil portuguesa, compensando o investimento inicial ligeiramente mais elevado, que se traduz em consumos anuais menores e num comportamento termo-energético equivalente ao dos edifícios tradicionais, que cumpre parcialmente os requisitos dispostos pelo REH, através da obtenção da classe energética mínima regulamentar.

Palavras-Chave: Sustentabilidade, *Earthship*, Autossuficiência, Desempenho.

ABSTRACT

The growing concerns about the environment lead to the constant search for sustainable measures for the most various sectors and the Civil Engineering sector is not an exception.

As an alternative measure to mitigate the potential environmental impacts of the construction industry there is the use of recycled materials, such as as tires, cans and glass bottles, in the replacement of conventional construction materials used in building elements, giving them a completely different function from the one they used to have and closing their life cycle. The Earthship is a buiding design concept created by the american architect Michael Reynolds who developed a principle to use waste in building solutions, without afecting the conventional functional requirements, while resulting in lower potencial life-cycle impacts.

The concept relies on a self-sufficiency ideology in which man takes benefit from natural resources in a sustainable manner. Therefore, waste materials are integrated in building elements and combined with the use of renewable energy sources to result in total self-sufficiency, which allows people to occupy locations that could be perceived as inhabitable.

In this master thesis, the thermo-energetic performance of an Earthship dwelling is analyzed, as well as its alignment with the legal framework in the context of the termal performance of buildings. Additionally, the environmental, functional and economical performances of an Earthship study case will be compared to the performances of a Portuguese conventional building with the same geometry, but that use the building elements normally used in Portugal. Thereby, through this master thesis a comparative analysis between two study cases is made based in one single project of a real one-family dwelling.

Through the Life Cycle Assessment of both two study cases, it was perceived that the Earthship is viable in the portuguese construction industry, and that the initial slightly higher investment is worth it, due to its lower annual consumption and its thermo-energetic performance similar to tradicional buildings, verifying its alignment with the legal framework.

Keywords: Sustainability, Earthship, Self-sufficiency, Performance

ÍNDICE

Agradecimentos.....	iii
Resumo.....	v
Abstract.....	vii
Lista de Figuras.....	xiii
Lista de Tabelas.....	xv
Lista de Abreviaturas, Siglas e Acrónimos.....	xvii
1. Introdução.....	1
1.1. Contextualização.....	1
1.2. Objetivos.....	3
1.3. Metodologia.....	4
1.4. Organização da dissertação.....	6
2. Earthship.....	9
2.1. O conceito Earthship.....	9
2.2. Classificação e tipos de edifícios Earthship.....	13
2.2.1. Construção Earth Sheltered.....	14
2.2.2. Construção Earth Bermed.....	15
2.2.3. Construção Above Ground.....	17
2.3. Desempenho funcional.....	18
2.3.1. Desempenho térmico de edifícios Earthship.....	18
2.3.2. Desempenho acústico de edifícios Earthship.....	20
2.4. Sistemas dos edifícios Earthship.....	21
2.4.1. Sistemas de abastecimento e drenagem de água.....	21
2.4.2. Ventilação de um edifício Earthship.....	22
2.4.3. Sistemas de produção de energia dos edifícios Earthship.....	24
2.5. Produção de bens alimentares.....	26
2.6. Resistência ao fogo.....	26
2.7. Caracterização das soluções construtivas.....	27
2.7.1. Parede exterior.....	27
2.7.2. Paredes interiores.....	35

2.7.3.	Pavimentos	42
2.7.4.	Cobertura.....	44
3.	Casos de estudo.....	47
3.1.	Soluções construtivas da versão Earthship.....	49
3.1.1.	Parede exterior.....	49
3.1.2.	Paredes interiores	53
3.1.3.	Cobertura.....	53
3.1.4.	Pavimentos	53
3.1.5.	Sistema estrutural da versão Earthship.....	54
3.2.	Soluções construtivas da versão Convencional.....	55
3.2.1.	Paredes exteriores.....	55
3.2.2.	Paredes interiores	55
3.2.3.	Cobertura.....	55
3.2.4.	Pavimentos	55
3.2.5.	Sistema estrutural da versão convencional.....	56
4.	Metodologia	59
4.1.	Análise do comportamento termo-energético.....	59
4.1.1.	Coeficiente de transmissão térmica.....	59
4.1.2.	Certificação energética dos edifícios.....	63
4.3.	Análise do impacte de ciclo de vida	71
4.3.1.	Desempenho funcional	74
4.3.2.	Desempenho ambiental	75
4.3.3.	Estimativa do tempo de retorno	79
4.3.4.	Desempenho económico	81
4.3.5.	Nota Sustentável dos edifícios	82
5.	Resultados	85
5.1.	Resultados do comportamento termo-energético do edifício	85
5.1.1.	Coeficiente de transmissão térmica.....	85
5.1.2.	Certificação energética dos edifícios.....	87
5.2.	Resultados da análise do impacte de ciclo de vida	94

5.2.1.	Desempenho funcional	94
5.2.2.	Desempenho ambiental	95
5.2.3.	Resultado da estimativa do tempo de retorno	96
5.2.4.	Desempenho económico	97
5.2.5.	Nota sustentável dos edifícios	98
6.	Discussão de resultados	99
6.1.	Comportamento termo-energético dos edifícios.....	99
6.1.1.	Coeficiente de transmissão térmica	99
6.1.2.	Comportamento térmico dos edifícios	100
6.2.	Análise do impacte de ciclo de vida dos edifícios.....	104
6.2.1.	Desempenho funcional dos edifícios.....	104
6.2.2.	Desempenho ambiental dos edifícios	104
6.2.3.	Estimativa do tempo de retorno	110
6.2.4.	Desempenho económico dos edifícios	110
6.2.5.	Nota sustentável dos edifícios	111
7.	Conclusões e desenvolvimentos futuros	113
7.1.	Conclusões.....	113
7.2.	Desenvolvimentos futuros	116
	Bibliografia.....	119
	Anexo I – Medidas da planta do edifício caso de estudo	125
	Anexo II – Representação esquemática da parede exterior earthship	127
	Anexo III – Representação esquemática da parede interior de latas	129
	Anexo IV – Representação esquemática da parede interior de garrafas de vidro.....	131
	Anexo V – Representação esquemática da cobertura earthship.....	133
	Anexo VI – Representação esquemática do pavimento cerâmico	135
	Anexo VII – Representação esquemática o pavimento em madeira	137
	Anexo VIII – Representação esquemática do pavimento das células botânicas.....	139
	Anexo IX – Coeficiente de transmissão térmica e dados para o cálculo da inércia térmica das soluções Earthship.....	141
	Anexo X – Coeficiente de transmissão térmica e dados para o cálculo da inércia térmica das soluções Convencionais	145

Anexo XI – Quantidades de material do edifício earthship	147
Anexo XII – Quantidades de material do edifício convencional	149
Anexo XIII – Impacte ambiental das soluções construtivas Earthship	151
Anexo XIV – Impacte ambiental das soluções construtivas Convencionais	153
Anexo XV – Emissão de CO ₂ ao longo do ciclo de vida dos edifícios (dados para a determinação do tempo de retorno)	155
Anexo XVI – Desempenho económico do edifício Earthship	157
Anexo XVII – Desempenho económico do edifício Convencional	159

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1: Evolução dos edifícios Earthship ao longo dos anos, desde as primitivas formas piramidais a), até ao modelo global b)	9
Figura 2.2: Habitação Earthship com grandes envidraçados inclinados orientados a sul e de arquitetura incomum	12
Figura 2.3: Earth Sheltered construction em que a cobertura e 3 fachadas são envolvidas por terra.....	14
Figura 2.4: Construção Earth Bermed	16
Figura 2.5: Edifício Earthship Alberta.....	16
Figura 2.6: Edifício constituído por três módulos Simple Survivor	17
Figura 2.7: Edifícios Earthship Above Ground	18
Figura 2.8: Parede exterior sem revestimento onde é possível ver os tubos de ventilação inseridos	23
Figura 2.9: Claraboia na cobertura para extração de ar iluminação interior.....	24
Figura 2.10: Lareira de uma habitação Earthship	25
Figura 2.11: Parede exterior em construção	30
Figura 2.12: Esquema descritivo da construção de uma parede exterior.....	32
Figura 2.13: Pormenor construtivo das juntas entre o topo das paredes e a cobertura.....	33
Figura 2.14: Representação da aplicação da técnica half-tire em obra.....	33
Figura 2.15: Aspeto de uma parede exterior com as ondulações dos pneus visíveis.....	34
Figura 2.16: Parede interior de latas em construção	36
Figura 2.17: Superfícies interiores inacabadas que apresentam o aspeto de um acabamento de parede interior com as latas visíveis.....	37
Figura 2.18: Metades de garrafas cortadas e unidas com fita adesiva prontas a colocar na parede - a) (Earthship Biotecture Portugal 2017), e parede interior em construção onde é possível verificar que as metades das garrafas se encontram unidas com fita adesiva - b)	39
Figura 2.19: Parede constituída por garrafas de vidro de diferentes cores -a); e de garrafas de vidro do mesmo tom -b).....	40
Figura 2.20: Divisão em que se verificam paredes parcial (à esquerda, em primeiro plano) e totalmente (à direita, em segundo plano) constituídas por garrafas e vidro, respetivamente..	40
Figura 2.21: Paredes de garrafas de vidro no quarto de banho	41
Figura 2.22: Habitação Earthship com pormenor de candeeiro exterior de garrafas de vidro	41

Figura 2.23: Pavimento em madeira- a), pavimento em pedra- b) e pavimento cerâmico- c)	43
Figura 2.24: Cobertura de edifício Earthship onde é possível distinguir dois tipos de revestimento: chapa lacada e chapas provenientes do fim de vida de eletrodomésticos	45
Figura 2.25: Cobertura em chapa lacada	46
Figura 2.26: Edifício Earth Sheltered onde é perceptível o efeito de camuflagem da cobertura ajardinada na paisagem	46
Figura 3.1: Planta do caso de estudo	47
Figura 3.2: Esquemática de um pneu	51
Figura 3.3: Secção da viga de betão armado- a); secção do pilar de betão armado- b)	56
Figura 5.1: Evolução do CO ₂ ao longo do ciclo de vida	96
Figura 6.1: Valores obtidos para as necessidades energéticas do edifício Earthship localizado em Beja e Vila Real	101
Figura 6.2: Valores obtidos para as necessidades energéticas do edifício convencional localizado em Beja e Vila Real	102
Figura 6.3: Resultados obtidos no SimaPro pelas duas metodologias para os 8 indicadores considerando os sistemas técnicos	106
Figura 6.4: Resultados obtidos no SimaPro pelas duas metodologias para os 8 indicadores sem considerar os sistemas técnicos	108

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1: Volumes de cada pneu	52
Tabela 3.2: Pesos dos constituintes da cobertura convencional.....	57
Tabela 4.1: Valores de resistência térmica superficial.....	60
Tabela 4.2: Valores do U_{ref} consoante zona climática do país que constam da regulamentação em vigor.....	62
Tabela 4.3: Classificação da inércia térmica.....	64
Tabela 4.4: Intervalos de valores para obtenção da classe energética	70
Tabela 4.5: Potenciais parâmetros em avaliação pela metodologia MARS-SC	72
Tabela 4.6: Indicadores ambientais considerados para o cálculo do impacte ambiental	73
Tabela 4.7: Distâncias entre os fornecedores e o local da obra	78
Tabela 4.8: Peso dos indicadores de desempenho na atribuição da nota sustentável dos edifícios na aplicação da metodologia MARS-SC.....	82
Tabela 5.1: Valores do U obtidos para as soluções construtivas do sistema Earthship	86
Tabela 5.2: Valores do U obtidos para as soluções construtivas do sistema Convencional ...	87
Tabela 5.3: Resultados do balanço de energia em Beja	88
Tabela 5.4: Resultados do balanço de energia em Vila Real	89
Tabela 5.5: Sistemas técnicos e as suas propriedades.....	90
Tabela 5.6: Resultados do balanço energético do edifício Earthship em Vila Real	92
Tabela 5.7: Resultados do balanço energético do edifício Earthship em Beja	92
Tabela 5.8: Resultados do balanço energético do edifício Convencional em Vila Real.....	93
Tabela 5.9: Resultados do balanço energético do edifício Convencional em Beja	93
Tabela 5.10: U_{global} do edifício Earthship	94
Tabela 5.11.: U_{global} do edifício Convencional.....	95
Tabela 5.12.: Valor de GWP para um kWh de energia.....	97

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E ACRÓNIMOS

Abreviaturas

€- Euro

A_p - Área útil de pavimento

B' - Dimensão característica do pavimento

C_2H_4 - Etileno

CFC-11 - Tricloromonofluormetano

cm - centímetro

CO_2 - Dióxido de carbono

E_{ren} - Energia produzida a partir de fontes renováveis

$E_{ren,ext}$ - Energia exportada proveniente de fontes renováveis

F_g - Fração envidraçada

I_A - Impacte ambiental

I_E - Impacte económico

I_F - Impacte funcional

I_t - Inércia térmica

kg - kilograma

km - quilómetro

l - litro

m - metro

MJ - Megajoule

mm - milímetro

M_{si} - Massa superficial útil de um elemento i

N_{ic} - Necessidades nominais anuais de energia útil para aquecimento

N_{tc} - Necessidades nominais anuais globais de energia primária

N_{vc} - Necessidades nominais anuais de energia útil para arrefecimento

°C - Graus Celsius

PO_4 - Fosfato

Q_a - Energia útil para preparação de água quente sanitária

r - Fator de redução da massa superficial útil

R_f - Somatório das resistências térmicas dos materiais constituintes do pavimento

R_{ph} - Taxa de renovação do ar no interior dos edifícios

R_{se} - Resistência superficial exterior

R_{si} - Resistência superficial interior

R_w - Somatório das resistências térmicas dos materiais constituintes da parede

Sb - Antimónio

S_i - Área da superfície interior do elemento i

SO₂ - Dióxido de enxofre

U - Coeficiente de transmissão térmica

U_{bf} - Coeficiente de transmissão térmica de pavimentos em contacto com o solo

U_{bw} - Coeficiente de transmissão térmica de paredes em contacto com o solo

λ - Condutibilidade térmica

Siglas e Acrónimos

ADP - *Abiotic Depletion* (Potencial de exploração do meio ambiente)

AP – *Acidification* (Potencial de Acidificação do solo e da água)

AQS - Águas Quentes Sanitárias

CC - Custo de Construção

DGEG - Direção Geral de Energia e Geologia

DIY - *Do it yourself*

DL - Decreto-Lei

ENR - *Embodied non-renewable energy* (Energia não renovável incorporada)

EP – *Eutrophication* (Potencial de Eutrofização)

EPS - Poliestireno expandido

ER - *Embodied renewable energy* (Energia renovável incorporada)

EUR- Euro

GEE - Gases Efeito de Estufa

GWP - *Global Warming Potential* (Alterações Climáticas expressas em potencial de aquecimento global)

LCA - *Life Cycle Assessment*

LNEC - Laboratório Nacional de Engenharia Civil

MARS-SC - Metodologia de Análise Relativa da Sustentabilidade

NS - Nota Sustentável

ODP - *Ozone Layer Depletion* (Potencial de Destruição da camada de Ozono estratosférico)

OSB - *Oriented Strand Board*

POCP - *Photochemical Oxidation* (Potencial de formação de Ozono expresso em concentração de oxidantes fotoquímicos)

RECS - Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Comércio e Serviços

REH - Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Habitação

RGR - Regulamento Geral do Ruído

RRAE - Regulamento dos Requisitos Acústicos dos Edifícios

SDG's- *Sustainable Development Goals*

XPS - Poliestireno extrudido

1. INTRODUÇÃO

1.1. Contextualização

O aquecimento global é um problema que está na ordem do dia e traduz-se pelo aumento significativo da temperatura na atmosfera, que se tem vindo a verificar desde meados do século XIX, mas que tem aumentado exponencialmente nas últimas décadas. Este aumento da temperatura é provocado pela emissão de gases de efeito de estufa, tais como o dióxido de carbono, o metano ou o óxido nítrico, todos eles produzidos pela ininterrupta queima de combustíveis fósseis por parte do Homem (National Geographic 2017).

Contrariando os mais céticos perante a situação atual do planeta, classifica-se a queima de combustíveis fósseis como causa direta da aceleração crescente do degelo dos calotes polares, que resulta diretamente no aumento do nível dos oceanos, provocando alterações graves nos ecossistemas, afirmadas pela extinção de inúmeras espécies animais e vegetais, e dizimando as zonas costeiras habitadas pelo Homem, potenciando as cada vez mais recorrentes catástrofes naturais que inquietam a humanidade (Pensamento Verde 2013).

Além da poluição atmosférica, o aumento descontrolado da produção e deposição de resíduos nas ruas e terrenos baldios e aterros, frutos de uma sociedade consumista e desconscienzada relativamente ao meio ambiente, provocam outros tipos de poluição, como a hídrica ou a do solo, que põem em causa a saúde pública.

É neste contexto que se insere a crescente preocupação com a consciencialização ambiental a nível mundial e a necessidade de gerir a utilização de recursos de uma forma eficiente e sustentável, isto é, não comprometendo a satisfação das necessidades das futuras gerações, cuja vida pode estar comprometida a breve prazo na ausência da tomada de medidas de consciencialização urgentes por parte de toda a humanidade.

Neste sentido foram estabelecidas pelas Nações Unidas as 17 metas europeias para o desenvolvimento sustentável, os *Sustainable Development Goals*, adotados em setembro de

2015 pelos maiores líderes mundiais, quer para países desenvolvidos ou em desenvolvimento, e que devem ser atingidas até 2030. De entre elas destacam-se a erradicação da pobreza, da fome, a gestão sustentável dos recursos hídricos, a sustentabilidade nas vertentes de consumo e produção e a adoção de medidas urgentes contra as alterações climáticas (United Nations 2017).

No âmbito de assegurar a sustentabilidade no consumo e na produção é introduzido o conceito de reciclagem em *closed-loop* que consiste num processo de produção no qual os resíduos são recolhidos, selecionados, consoante o seu valor, tipo e composição, e reciclados tornando-se em matéria-prima para o fabrico de novos produtos (Mazzoni 2012).

Tendo em vista o contorno das adversidades mencionadas e a redução da poluição através da gestão sustentável de recursos, com a implementação do conceito *closed-loop* (Lacarrière et al. 2015), o arquiteto americano Michael Reynolds tem vindo a desenvolver, desde a década de 1970, um modelo de construção de edifícios de habitação autossuficientes e sustentáveis feitos a partir de materiais provenientes do fim de vida de outros produtos, o qual denominou de *Earthship*. Este conceito, direcionado apenas a edifícios de habitação, valoriza o conforto e a qualidade de vida dos habitantes, abdicando de grande parte da matéria-prima tradicionalmente utilizada na construção, afastando-se ainda dos típicos projetos e métodos construtivos convencionais (Earthship Bioteecture 2017f).

A exclusão de grande parte dos materiais tradicionalmente utilizados na construção convencional torna este sistema construtivo revolucionário, na medida em que renuncia à enorme quantidade de produção industrial que é efetuada para assegurar a construção dos edifícios correntes, e que é responsável por grande percentagem da poluição mundial (Vertex-Engenharia e Arquitetura 2013).

Os edifícios desenvolvidos segundo este conceito podem ser fabricados essencialmente com recurso a pneus de automóveis usados, evitando assim a sua queima ou deposição, latas e/ou garrafas de vidro. Estes edifícios promovem a sustentabilidade e autossuficiência na medida em que possuem equipamentos que recolhem, filtram e tratam a água da chuva, as águas negras e cinzentas, aproveitando-as para uso corrente (Ip & Miller 2009).

Estes edifícios são conhecidos no país de origem por dispensarem a necessidade de sistemas de climatização, devido às características dos elementos construtivos que o constituem e ao design passivo típico destas habitações (Chiras & Mother Earth News 2005). O conceito valoriza ainda a produção e utilização de energias renováveis, como a solar e a eólica, e a produção de bens alimentares para consumo próprio de forma a obter alimento prescindindo da necessidade de deslocação às civilizações mais próximas para a sua aquisição (Morgan 2002).

Sendo o conceito *Earthship* ainda relativamente desconhecido em Portugal e no resto da Europa, carente em estudos relacionados com a Engenharia Civil na sociedade europeia, e estando ainda a sofrer constantes aperfeiçoamentos, ao longo desta dissertação serão identificadas as características técnico-funcionais, ambientais e económicas de um edifício *Earthship*, evidenciando as mais-valias associadas a este tipo de sistema no que diz respeito às suas características técnicas, à potencial redução dos impactes ambientais, à poupança energética e aos benefícios económicos de ciclo de vida, recorrendo a uma análise comparativa com um edifício convencional em Portugal.

O estabelecimento desta comparação levará a conclusões acerca da viabilidade do sistema *Earthship* como uma medida de sustentabilidade a implementar na construção tradicional, evidenciando as possíveis mais-valias ou barreiras associadas à disseminação do conceito em Portugal.

1.2. Objetivos

O principal objetivo desta dissertação é identificar as características técnico-funcionais, ambientais e económicas dos edifícios construídos com base no conceito *Earthship*, uma vez que, para o contexto português, ainda não existem quaisquer estudos acerca da viabilidade deste. Com vista a evidenciar as mais-valias e as barreiras associadas ao conceito, os resultados da análise efetuada ao edifício *Earthship* serão comparados com os obtidos pela análise de um edifício com geometria semelhante, mas que utiliza as soluções construtivas convencionalmente aplicadas em Portugal.

Através da total caracterização do conceito *Earthship* pretende-se ainda identificar soluções para o fecho de ciclo de vida de produtos através do seu aproveitamento no sector da construção,

ao invés da incineração ou deposição para as quais seriam encaminhados, inculcando assim um sentido de consciencialização ambiental ao sector.

Com esta dissertação pretende-se avaliar a sustentabilidade e os impactes ambientais do ciclo de vida de um edifício *Earthship*, cujo maior volume de materiais utilizados são provenientes do fim de vida de outros produtos. Esta avaliação permitirá concluir se este é um conceito viável do ponto de vista ambiental e se constitui uma medida ambiental importante a implementar para uma construção sustentável de edifícios no futuro, face às metodologias adotadas atualmente na construção civil. Para a obtenção destas conclusões, será necessário executar este mesmo tipo de avaliação considerando o ciclo de vida de um edifício convencional, de geometria idêntica.

Paralelamente a esta análise será realizado um estudo térmico do edifício, enquadrando-o na legislação portuguesa em vigor, nomeadamente no Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Habitação, com vista a avaliar a possibilidade de poupança energética face ao conceito de construção tradicional, comparando ainda os sistemas atualmente aplicados nos edifícios comuns com aqueles que permitem um estilo de vida autossuficiente num edifício *Earthship*. Desta forma, pretende-se obter uma certificação energética para ambos os conceitos a comparar com vista a identificar as possíveis mais-valias de cada um deles no que diz respeito ao conforto dos habitantes e poupança económica e energética.

Outro objetivo desta dissertação é obter uma análise de custo de construção de um edifício *Earthship*, identificando os seus aspetos positivos ou negativos face a esta análise quando comparado a um edifício convencional de geometria semelhante.

1.3. Metodologia

A fase inicial desta dissertação passa pelo levantamento de dados técnico-funcionais acerca do sistema *Earthship*, assim como a sua origem, as técnicas de execução utilizadas em obra, das metodologias de pormenorização e de escolha dos materiais utilizados e características que o definem. Este levantamento reunirá a informação necessária à definição e pormenorização de soluções construtivas do edifício real que será caso de estudo nos capítulos posteriores.

Tendo por base a planta do caso de estudo, serão quantificados os materiais necessários à sua construção, para a versão *Earthship* e convencional. Estas quantidades serão necessárias às fases posteriores de análise comparativa entre conceitos.

Estabelecidos os conceitos e dados necessários, será realizada uma previsão do comportamento térmico das soluções construtivas utilizadas em ambos os edifícios para posterior avaliação do seu comportamento térmico, utilizando a metodologia regulamentar prescrita pelo Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Habitação (REH). Esta avaliação será executada para ambos os edifícios em duas localizações diferentes de Portugal, onde se verificam condições climáticas extremas ao longo do ano a nível nacional, são elas em zonas rurais adotadas dos distritos de Beja e Vila Real. A região de Vila Real é considerada o extremo de temperaturas baixas, uma vez que facilmente atinge temperaturas negativas durante as estações frias e em Beja verifica-se precisamente o oposto, onde se registam por vezes temperaturas acima dos 40°C durante o verão (IPMA 2004).

Os materiais quantificados serão considerados para o desempenho global pela contabilização do impacto resultante da sua produção, considerando a base de dados de LCI Ecoinvent (ecoinvent 2017). A estes materiais serão associados os respetivos possíveis fornecedores de origem e locais de destino em fim de vida para ambas as localizações de implantação do caso de estudo mencionadas através de meios convencionais, de forma a contabilizar o impacto do seu transporte, que será um dado de entrada no *software SimaPro*[®]. Assim, será possível estimar os impactos ambientais associados a cada solução construtiva dos casos em estudo (SimaPro 2017).

Será efetuado um levantamento dos custos materiais e operacionais relativos à construção dos edifícios, com recurso à ferramenta Gerador de Preços do *CYPE*[®], para posterior comparação entre ambos através do cálculo do impacto económico de cada um (CYPE Ingenieros S.A. 2017). Devido à inexistência de certos tipos de soluções construtivas na sua íntegra para obtenção direta do custo total na ferramenta, será realizada a repartição de custos com base em soluções semelhantes, substituindo os materiais não utilizados pelos inexistentes e obtendo-se custos de construção aproximados.

A obtenção dos resultados das análises mencionadas permitirá a determinação do desempenho ambiental, funcional e económico de cada um dos edifícios, o que permitirá uma análise

comparativa entre ambos recorrendo a uma análise pela Metodologia de Análise Relativa da Sustentabilidade (MARS-SC) que classifica o nível do desempenho global respetivo a cada edifício baseando-se em indicadores ambientais, económicos e funcionais (Bragança & Mateus 2006). A partir desta análise realizar-se-á uma discussão de resultados conclusiva na qual será possível comparar os benefícios e barreiras de uma habitação *Earthship* face aos edifícios projetados de forma convencional.

1.4. Organização da dissertação

Esta dissertação é composta por um conjunto de sete capítulos, iniciando-se no Capítulo 1, a introdução, onde é efetuado um enquadramento geral acerca do tema da dissertação assim como os objetivos propostos para a sua realização.

No Capítulo 2, é efetuado um levantamento dos conceitos associados ao conceito *Earthship*, aprofundando a informação a ele relacionada relevante ao prosseguimento desta dissertação.

No Capítulo 3, são descritos os casos de estudo que serão alvos de posterior análise comparativa, inicializando assim a base para o estudo desenvolvido ao longo dos capítulos seguintes.

No Capítulo 4, é apresentada a metodologia para determinação do comportamento termo-energético e para a avaliação do ciclo de vida do edifício dos casos de estudo descritos no Capítulo 3. Sendo os resultados obtidos expostos no Capítulo 5 para posterior análise comparativa e conclusiva no Capítulo 6.

Ao longo do Capítulo 5 são apresentados todos os resultados obtidos através das metodologias descritas no Capítulo 4. Nomeadamente os resultados da avaliação do comportamento termo-energético dos edifícios e da análise do desempenho dos casos de estudo em termos ambientais, funcionais e económicos. Os resultados obtidos permitirão efetuar-se uma análise comparativa e conclusiva ao longo do Capítulo 6.

Assim, no Capítulo 6, faz-se uma análise aprofundada dos resultados obtidos ao longo dos capítulos anteriores assim como a formulação de conclusões alcançadas pela realização desta dissertação.

Por fim, o Capítulo 7 apresenta as conclusões gerais obtidas pela realização desta dissertação, com sugestões de desenvolvimentos futuros no âmbito do tema desenvolvido.

2. EARTHSHIP

2.1. O conceito *Earthship*

O conceito Earthship é um modelo de construção de edifícios de habitação, que tem vindo a ser desenvolvido pelo seu criador, o arquiteto americano Michael Reynolds (Ip & Miller 2009), desde a década de 1970, estando este em constante aperfeiçoamento ao fim de longos anos de batalha judicial em busca da legalização do conceito (Smith & Seyfang 2013). Prova disso são as várias geometrias de edifícios experimentais testados, construídos ao longo dos últimos 40 anos, nas paisagens desérticas de Taos no Novo México, terra natal do *Earthship* (Earthship Biotecture 2017a). Muitas das habitações que aí se avistam encontram-se habitadas e em perfeito estado funcional, sendo algumas utilizadas para turismo habitacional de luxo (Earthship Biotecture 2017e).

Ao longo das últimas décadas, os edifícios *Earthship* evoluíram o seu aspeto de forma acentuada, passando dos primitivos formatos piramidais, ilustrados na Figura 2.1. a), ao modelo mais eficiente até à data, o modelo global, ilustrado no edifício da Figura 2.1. b).



a)



b)

Figura 2.1: Evolução dos edifícios *Earthship* ao longo dos anos, desde as primitivas formas piramidais a), até ao modelo global b) (Earthship Biotecture 2017j)

A *Earthship Biotecture* é a empresa criada e liderada por Michael Reynolds, sediada em Taos, é a detentora da patente do conceito original, que funciona como uma academia de aprendizagem intensiva dos princípios do conceito, métodos construtivos e filosofia de vida, na qual o próprio é o docente. Esta academia, para além de tornar os interessados aptos a construir o seu próprio edifício, tem como grande objetivo realizar deslocações humanitárias para, com a ajuda de mão-de-obra voluntária, construir escolas, abrigos em caso de catástrofe natural e construção de habitações para populações desfavorecidas em diversas partes do planeta, tendo por base as filosofias *Earthship* e assim incutindo o seu o seu legado às populações de forma a ensinar aqueles que pouco ou nada têm, a tirar proveito do meio que os rodeia de forma sustentável (Earthship Biotecture 2017c).

Este conceito tem como grande objetivo reduzir a poluição através da gestão sustentável de recursos (Mueller 2015), isto é, não comprometendo a satisfação das necessidades das gerações futuras. Desta forma, os materiais provenientes do fim de vida de outros produtos serão preparados para serem reutilizados na construção de edifícios, criando assim um processo de produção de matéria-prima a partir da seleção de resíduos valorizáveis, ou seja, um processo de reciclagem em *closed-loop* (Mazzoni 2012).

Essencialmente, o conceito *Earthship* concentra-se na estimulação da independência e autossuficiência do Homem relativamente ao seu meio, tornando-o apto para construir com as próprias mãos sistemas autónomos que lhe permitam sobreviver em quaisquer locais de grandes amplitudes térmicas ou em situações de catástrofe no planeta, de forma segura e confortável, tendo acesso a tudo o que é essencial à vida.

Este tipo de edifícios é autónomo relativamente ao meio em que se insere, recolhendo e tratando a própria água para consumo, possibilitando o cultivo de bens alimentares e a produção da sua própria energia elétrica, com recurso a energias renováveis de fonte solar, eólica ou hídrica (Ludwig & Everson 2017).

Os materiais tradicionalmente utilizados na construção são substituídos por materiais como pneus usados, latas de alumínio e garrafas de plástico ou vidro (Arthur 2001). Quando conjugados e aglutinados numa solução construtiva adequada e bem executada, com base nos procedimentos descritos pelo conceito original, permitem a construção de edifícios com

segurança e funcionalidade equivalentes ou superiores às dos construídos pelos métodos convencionais (Earthship Bioteecture 2017h).

Este tipo de materiais são maioritariamente combinados com terra ou cimento. Neste conceito, não existe uma total exclusão dos materiais convencionalmente utilizados, mas sim uma grande redução no seu uso, deixando estes de serem constituintes maioritários da construção (Reynolds 1990).

Normalmente, os edifícios concebidos com base neste conceito possuem um sistema estrutural de madeira, no qual as paredes, de função estrutural, ganham forma a partir de pneus empilhados com terra compactada no seu interior e os seus espaços vazios são preenchidos com lama e posteriormente revestidos com argamassa de forma a obter uma superfície o mais regular possível (Earthship Bioteecture 2017h).

Muitas foram as tentativas por parte de Michael Reynolds em busca de encontrar o desenho e conjugação de materiais perfeitos para a construção da habitação mais segura, durável e sustentável, com base no conceito por si criado. As características dos materiais utilizados deram liberdade à conceção das mais variadas formas de edifícios, fazendo com que estes possuam formatos idênticos a autênticas naves espaciais, daí a proveniência da sua denominação, *Earthship* (nave terrestre), e sendo portanto, muito diferentes daquilo que é usualmente observado, tal como se pode observar na Figura 2.2. O formato destes é em grande parte influenciado pelo objetivo de potenciar o aproveitamento da energia solar, através de grandes envidraçados orientados a sul, e com a inclinação adequada consoante a localização terrestre, para melhor aquecimento do espaço interior, como é também possível verificar na habitação ilustrada na Figura 2.2. Estes edifícios cuja geometria é adaptada para maximizar os ganhos térmicos pela luz solar são denominados edifícios de desenho passivo. O mesmo acontece na integração funcional dos painéis solares fotovoltaicos utilizados como principal fonte de energia elétrica neste tipo de habitações (Reynolds 1990).



Figura 2.2: Habitação Earthship com grandes envidraçados inclinados orientados a sul e de arquitetura incomum (Chelnys 2015)

Os edifícios são normalmente divididos em duas partes principais: a zona verde e a zona de conforto. A zona verde funciona como uma estufa onde são cultivadas as plantas de onde serão obtidos os bens alimentares para consumo próprio. Esta zona encontra-se na parte sul do edifício, ao longo do seu comprimento, onde se dá a entrada de luz pelos grandes envidraçados inclinados, concentrando o calor nessa zona que posteriormente aquece a zona de conforto da habitação, isto é, a zona útil onde estão os ocupantes.

Esta repartição em zonas distintas faz com que haja ao mesmo tempo uma interação constante com a natureza por parte dos habitantes uma vez que as divisórias entre elas são envidraçadas para permitir a entrada de luz natural na zona de conforto do edifício e facilitar a transferência de calor proveniente da luz solar.

As paredes interiores são constituídas tendo como principais materiais as latas de refrigerante e as garrafas de vidro. As garrafas de vidro, para além de utilizadas como um elemento construtivo, possuem também uma função decorativa tornando as paredes que constituem em vitrais através da combinação de garrafas de vidro de diferentes cores que permitem a passagem de luz entre divisões, como será possível verificar ao longo deste capítulo.

Os edifícios pioneiros do conceito situam-se nos Estados Unidos, embora já existam *Earthships* espalhados um pouco por todo o mundo, nomeadamente na Europa, em Brighton, na Escócia, na Suíça, e até em Portugal, onde existe já a *Earthship Biotecture- Portugal*, apesar de o

conceito ser ainda desconhecido pela grande maioria dos decisores da indústria da construção nacional.

Como já foi referido, este é um tipo de construção que se baseia na conceção e construção de edifícios que promovem a autossuficiência e que constituem cada um, por si só, um sistema totalmente independente. Assim, estas habitações são energeticamente sustentadas a partir da energia solar, eólica ou hídrica através de sistemas próprios da habitação que lhe conferem independência do meio onde se situam, a contrário dos sistemas convencionais que se encontram ligados à rede pública, seja ela elétrica ou de abastecimento e drenagem de água, que são muitas das vezes inacessíveis em certos locais mais remotos. Assim, é possível construir um edifício *Earthship* em zonas que são, à partida, inabitáveis e que carecem de redes elétricas, de saneamento básico e/ou de abastecimento de águas, proporcionando uma vida equitativamente confortável relativamente à dos moradores das zonas ditas habitáveis.

2.2. Classificação e tipos de edifícios Earthship

Os edifícios *Earthship*, independentemente da sua tipologia, são classificados como sendo do tipo *heavyweight construction*, isto é, são construções pesadas (Ip & Miller 2009). Esta classificação prende-se ao peso e quantidade dos seus constituintes, que aglomerados formam uma construção robusta e pesada. Esta tipologia é usualmente caracterizada por sistemas construtivos de alvenaria em tijolo, betão armado, tijolos de barro, terra compactada, entre outros (EESC glossaries 2017). Neste caso, o principal elemento que torna este tipo de construção uma construção pesada é a terra compactada, uma vez que é o principal constituinte das suas paredes e as torna pesadas como verdadeiros blocos de pedra. As *heavyweight constructions* caracterizam-se também por possuir uma maior capacidade de armazenar energia térmica, melhorando o conforto térmico e reduzindo os gastos energéticos provenientes de sistemas de climatização quando combinado com um bom isolamento térmico e um desenho passivo, isto é, suscetível à absorção e aproveitamento da luz solar para fins energéticos (Ip & Miller 2009).

São construções apropriadas e adaptáveis a climas onde se verificam grandes amplitudes térmicas nas transições dia-noite e com importantes necessidades de arrefecimento e aquecimento, uma vez que a grande massa e espessura dos seus constituintes e a baixa condutividade térmica destes permite a retenção do calor acumulado no seu interior durante a

absorção solar diurna durante mais tempo, retardando a sua passagem através dos elementos e, consequentemente, o seu arrefecimento.

Quanto à sua tipologia as construções *Earthship* podem ser classificadas de 3 formas: *Earth Sheltered*, *Earth Bermed* ou *Above Ground*.

2.2.1. Construção *Earth Sheltered*

Este tipo de construção utiliza o terreno como manta isolante que protege o edifício de temperaturas extremas, da chuva, do vento, entre outros fenómenos atmosféricos (Ip & Miller 2009). Adapta-se visualmente ao meio envolvente natural, camuflando-se na paisagem envolvente e fornecendo mais espaço verde ao lote e mais área para a vida selvagem, diminuindo ao máximo a poluição visual.

A terra cobre normalmente três fachadas e a cobertura da habitação, sendo esta última o seu principal fator de diferenciação das habitações *Earth Bermed*. Outro fator de distinção é o facto de a habitação se encontrar abaixo daquele que é o aparente nível do terreno (Chiras & Mother Earth News 2005). A Figura 2.3 comprova a caracterização feita anteriormente na habitação nela ilustrada.



Figura 2.3: *Earth Sheltered* construction em que a cobertura e 3 fachadas são envolvidas por terra (Linda S. Velazquez 2014)

Uma vez que a terra sobre a cobertura aumenta o seu peso próprio, poderá haver a necessidade de substituir as vigas de madeira tipicamente colocadas em edifícios *Earthship* por um sistema estrutural de betão armado. No entanto, a solução construtiva adaptada às paredes de fachada

continua a ser constituída por pneus e terra compactada no seu interior, apesar de, no caso de o sistema estrutural ser de betão armado, estas não possuírem função estrutural.

2.2.2. Construção *Earth Bermed*

Neste tipo de construção, a terra é puxada desde o nível do terreno para as paredes exteriores da habitação, constituídas por pneus com terra compactada no interior, cobrindo-as até ao nível da cobertura formando uma espécie de uma encosta. A grande diferença entre esta e a *Earth Sheltered* é que nesta, o telhado é executado com recurso a soluções construtivas que apresentam revestimento material que não seja a terra. Assim, tratando-se de soluções construtivas para cobertura de peso próprio reduzido, não se verifica a necessidade da existência de um sistema estrutural em betão armado, mas sim composto pelas paredes estruturais de pneus e as vigas de madeira, como é típico do conceito. Outro importante fator de diferenciação entre esta e a referida anteriormente, é que esta é sempre construída acima do nível do terreno, e não inserida numa escavação abaixo do nível do terreno como no caso anteriormente explicitado.

As vigas de madeira, que compõem a sua estrutura, possuem vãos de comprimento que rondam um máximo de aproximadamente 7 metros, não só por uma questão de segurança estrutural, como também pela dificuldade em obter uma peça de madeira maciça com esse comprimento. Também por questões funcionais, no que diz respeito à iluminação e aquecimento do edifício de forma passiva este limite não deve ser ultrapassado. Assim, estas habitações não possuem uma largura superior a 8 metros, à exceção da possibilidade de colocação de uma parede estrutural a meio da habitação de solução construtiva semelhante à das paredes de fachada, de forma a nela se apoiar uma nova viga. Contudo, o mais comum é o seu aumento apenas em comprimento ou altura.

No entanto, são usualmente constituídas por um único piso, uma vez que a estabilidade das paredes exteriores pode estar condicionada para pés-direitos superiores a 3,50 metros, sendo que o mesmo acontece para as *Above ground* e para as *Earth sheltered* no caso de a estrutura não ser de betão armado. Porém, existe a possibilidade de aumentar o número de pisos, que não deve ser superior a 3, mediante o pé-direito considerado, aplicando o devido reforço estrutural, uma vez que as paredes exteriores possuem função estrutural.

A Figura 2.4 ilustra a formação de encostas de terra em torno da habitação construída acima do nível do terreno. No entanto, a cobertura é ajardinada, o que lhe dá um aspeto mais semelhante às construções referidas anteriormente, apesar de não se enquadrar totalmente nessa tipologia.



Figura 2.4: Construção *Earth Bermed* (outside table plans free 2014)

As fachadas cobertas por terra são todas menos as orientadas a sul, de forma a não bloquear os ganhos solares significativos que contribuem para uma melhor eficiência energética do edifício. Estas serão ainda devidamente isoladas para evitar a migração da humidade do terreno até ao edifício.

O modelo mais eficaz até à data, o Modelo Global, insere-se nesta tipologia. Este edifício, à semelhança dos anteriores, possui todas as fachadas, de constituição semelhante, cobertas por terra, à exceção da orientada a sul que é totalmente envidraçada. Um exemplo de edifício deste tipo é o *Earthship Alberta*, ilustrado na Figura 2.5 (Michael Reynolds 2017).



Figura 2.5: Edifício *Earthship Alberta* (Earthship Biotecture 2014)

Nesta tipologia insere-se ainda o modelo da *Earthship Biotecture* chamado *Simple Survivor*, que consiste na construção de pequenos módulos de planta semicircular constituídos apenas por paredes exteriores de pneus e cobertura. São habitualmente constituídos como uma alternativa rápida, urgente e segura de abrigar pessoas e bens, ou tipicamente como pequenos módulos para turismo habitacional, ao estilo *bungalow* (Earthship Biotecture 2017g).

Existe também a possibilidade de expansão deste edifício por junção de módulos individuais, como ilustra a Figura 2.6, onde está representada uma habitação do tipo constituída por três módulos.

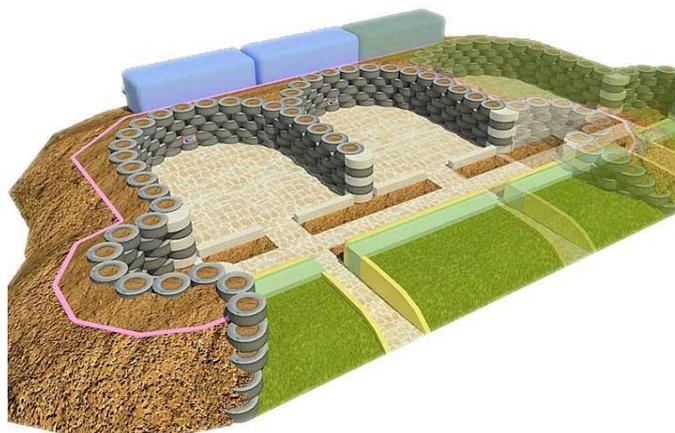


Figura 2.6: Edifício constituído por três módulos *Simple Survivor* (Earthship Biotecture 2017g)

2.2.3. Construção *Above Ground*

A construção *Above Ground*, é, tal como o próprio nome indica, contruída acima do chão, ou seja, é construída acima do nível do terreno e pode ser constituída por vários pisos, apesar de o aconselhável ser apenas um, pela mesma razão já explicitada anteriormente. No entanto nunca deve ultrapassar os 2 ou 3 pisos, mediante o pé-direito considerado e o reforço estrutural aplicado, uma vez que, neste caso, as paredes de fachada possuem função estrutural e são utilizadas vigas de madeira.

As suas paredes exteriores são, tal como as mencionadas anteriormente, constituídas por pneus usados cheios de terra compactada no seu interior, sendo mais uma vez a terra o seu principal constituinte e detentora das propriedades que lhe conferem o seu característico desempenho funcional, uma vez que os pneus possuem uma função de mera contenção dos volumes de terra.

Apesar de o constituinte maioritário das suas paredes exteriores ser a terra, neste caso, o seu volume é bem menor que nas tipologias anteriormente indicadas, uma vez que esta é utilizada apenas para o enchimento dos pneus e não para cobrir também as fachadas externamente.

Na Figura 2.7 são ilustrados dois exemplos de edifícios *Earthship Above Ground*, que à primeira vista são edifícios perfeitamente comuns, apesar de assumirem as formas excêntricas que definem o conceito.



Figura 2.7: Edifícios *Earthship Above Ground* (*The owner-builder network: The DIY Community 2017; David Hurtado 2015*)

2.3. Desempenho funcional

2.3.1. Desempenho térmico de edifícios *Earthship*

As habitações que possuem como principal constituinte dos seus sistemas construtivos a terra, proporcionam conforto térmico no seu interior ao longo de todo o ano, porém este facto não está associado ao bom isolamento térmico da terra, pois esta não é um bom material isolante (Chiras & Mother Earth News 2005).

Uma vantagem do uso da terra na constituição de elementos construtivos é que, muitas das vezes, esta se encontra no terreno onde será erigida construção em quantidades suficientes para a obra, evitando gastos com movimentos de terras que impliquem grandes distâncias.

Contudo, uma vez que apenas grandes espessuras de terra podem impedir a passagem da temperatura e mantê-la constante sem qualquer isolamento, estarão implicados movimentos de grandes volumes de terra na obra que se podem traduzir em elevados gastos em mão-de-obra e

equipamentos. Contudo, esta grande espessura apenas se revela em edifícios de tipologia *Earth Sheltered* e *Earth Bermed*, uma vez que apenas estes têm as suas soluções construtivas constituídas e cobertas por grandes volumes de terra, envolvendo-os parcialmente em espessas camadas de terra. Isto fará com que seja expectável que possuam um melhor comportamento termo-energético, porém custos de construção mais elevados.

O mesmo não acontece para as construções de tipologia *Above Ground*, uma vez que estas possuem as faces externas das paredes exteriores diretamente expostas às variações de temperatura exterior e a única espessura de terra que as constitui é igual ou inferior a 60 cm, correspondente ao diâmetro total dos pneus. Isto possibilita trocas de calor mais rápidas entre o interior e o exterior do edifício, deixando-o mais suscetível a fenómenos de trocas por condução, convecção ou radiação e a infiltrações de ar.

Assim, a terra tem um efeito moderador de temperatura, protegendo-o também do vento, quer pela espessura da sua camada na parede exterior, quer pela sua colocação em encosta ao longo das paredes exteriores mudando a sua direção, e protegendo o edifício do sol das estações quentes (Al-Temeemi & Harris 2003).

Um exemplo simples para entender a poupança energética associada às soluções deste conceito é o seguinte: numa localização em Portugal onde a temperatura média anual é de 13°C, e é regulamentar que, para ser atingido o conforto térmico na estação de aquecimento, a temperatura interior dos edifícios deve estar a um mínimo de 18°C. Se existir uma parede que dificulte as trocas de calor entre o interior e o meio exterior, a temperatura interior do edifício não atingirá valor muito diferentes da temperatura média anual em caso de temperaturas mais frias no exterior. Assim, seria necessário um sistema de aquecimento que elevasse a temperatura interior do edifício num valor médio de apenas 5°C. Esta pequena necessidade de aquecimento seria facilmente assegurada pelo desenho passivo (Ip & Miller 2009) de um edifício *Earthship*, ou seja, pela entrada de radiação solar na estação fria através da grande área envidraçada orientada a sul que aquecerá a habitação. Este calor, uma vez no interior do edifício, dificilmente é disperso novamente para o exterior devido à cobertura de terra sobre as restantes fachadas, mantendo o edifício a uma temperatura constante, uma vez que as trocas se processam muito lentamente devida à grande espessura das paredes de terra (Grindley & Hutchinson 1996). Este efeito pode ser incrementado pelo acrescento de camadas

de isolamento térmico neste tipo de edifícios, podendo reduzir ainda mais as necessidades de aquecimento do edifício e aumentar consequentemente a poupança energética.

Com isto, é possível desde logo concluir que as habitações de tipologia *Earth Bermed* e *Earth Sheltered* terão maior poupança energética que as *Above Ground*, uma vez que as suas paredes exteriores possuem uma maior espessura devido às grandes camadas de terra que as constituem (Ordenes et al. 2008).

É importante frisar que todos os estudos e aperfeiçoamentos feitos às técnicas construtivas foram efetuados para edifícios construídos em Taos, onde as temperaturas anuais podem variar entre os -15°C e os 45°C , sendo por isso uma localização com uma amplitude térmica de 60°C , o que é um valor extremamente elevado. Esta grande amplitude foi também um dos fatores que impulsionaram o arquiteto Michael Reynolds na busca de sistemas de construção sustentáveis que levassem a uma maior poupança energética na região, onde os gastos de climatização para soluções convencionais são, à partida, elevados.

2.3.2. Desempenho acústico de edifícios *Earthship*

O isolamento acústico de um edifício é um requisito regulamentar, principalmente nas zonas urbanas, nas quais os ruídos causam distúrbios aos moradores. Como tal, existe em Portugal um enquadramento legal para a regularização do ruído com base nas disposições do Regulamento Geral do Ruído (RGR) (RGR- Portugal 2007) e do Regulamento dos Requisitos Acústicos dos Edifícios (RRAE) (RRAE- Portugal 2002).

No entanto, não existem registos de dados bibliográficos acerca do desempenho acústico dos edifícios *Earthship* e, como o conceito incide na construção de edifícios autossuficientes em locais remotos, considera-se que o isolamento acústico não será um fator importante, uma vez que não existem fontes de ruído de vizinhança nas proximidades. Contudo, é uma área de estudo de interesse no que toca a este tipo de edifícios, não só pela necessidade de definição e enquadramento legal na legislação portuguesa, como para obter esse enquadramento na introdução do conceito em zonas urbanas, nas quais estes requisitos são obrigatórios.

2.4. Sistemas dos edifícios Earthship

2.4.1. Sistemas de abastecimento e drenagem de água

Sendo a sustentabilidade a ideologia base do conceito *Earthship*, a gestão de recursos de uma forma sustentável é o seu principal objetivo. Como tal, a água, que é o recurso mais precioso do Homem, deve ser igualmente gerida de forma sustentável, evitando gastos desnecessários e sendo aproveitada sempre que possível.

Assim, o conceito *Earthship* prescinde de ligação às redes públicas de abastecimento e drenagem de águas, dispondo de sistemas de reaproveitamento de água, reutilizando-a para os diversos usos de forma sequencial e o maior número de vezes possível. O abastecimento de água à habitação é então efetuado com recurso a um sistema de recolha de águas pluviais (Reynolds 2009).

A água da chuva que cai sobre a cobertura é recolhida através do sistema de drenagem de águas pluviais e encaminhada para grandes reservatórios cujas dimensões devem ser determinadas em projeto com base no número de ocupantes da habitação e na frequência da pluviosidade na região. São tipicamente colocados reservatórios fracionados de 5000 litros cada, cujo número deve ser o necessário para perfazer o número de litros correspondentes às necessidades ocupacionais (Reynolds 2009).

No caso das habitações construídas com base no Modelo Global, estes reservatórios encontram-se enterrados pela encosta de terra vegetal que cobre a fachada norte da habitação pelo exterior (Michael Reynolds 2017).

A água armazenada nestes reservatórios passa por um sistema de filtração, capaz de retirar a matéria sólida em suspensão e em dissolução, sendo depois reencaminhada para o edifício para consumo, abastecendo cozinhas e casas de banho. Por sua vez, a água resultante dos banhos, lavatórios ou máquinas de lavar é também recolhida e utilizada para as descargas de autoclismo ou para a rega, com o devido tratamento químico para retirar impurezas prejudiciais à vegetação (Reynolds 1991). No entanto, isto nem sempre é necessário, uma vez que as pessoas que habitam *Earthships* acabam por adotar um estilo de vida autossuficiente ao ponto de fabricar os seus próprios sabonetes artesanais, isentando-os de produtos químicos que contaminam a

água. Assim, a mesma quantidade de água é utilizada para diversos fins até ser encaminhada para o saneamento, abandonando o edifício, sendo um mesmo volume de água utilizado cerca de 3 vezes.

Assim, a rede de abastecimento está diretamente ligada à rede de drenagem de águas pluviais, uma vez que são estas as águas que abastecem o edifício, funcionando em conjunto para a poupança de água e conseqüentemente dos gastos a ela associados, ao contrário dos sistemas convencionais em que estas redes são totalmente independentes, sendo a água que abastece o edifício proveniente da rede pública e diretamente encaminhada para a rede pública de drenagem ao fim de uma única utilização.

Um grande inconveniente da recolha e aproveitamento de água, é a necessidade de grandes áreas e infraestruturas para o seu armazenamento, o que nem sempre é alcançável. No entanto, tendo por base que o facto deste conceito ser adequado à construção de edifícios em zonas remotas, as áreas disponíveis serão quase sempre suficientes para enquadrar esta infraestruturas tendo em conta as necessidades dos ocupantes (Reynolds 1991).

Contudo, é também possível o abastecimento de água através de um furo de captação do subsolo, nos casos em que exista acesso a água subterrânea. A existência de um sistema de captação permitiria solucionar o inconveniente da necessidade de grandes áreas e infraestruturas associadas à recolha de águas pluviais.

2.4.2. Ventilação de um edifício *Earthship*

A ventilação dos edifícios *Earthship* é efetuada sem recurso a meios mecânicos, através de ventilação natural. Convencionalmente, a ventilação natural é realizada pela abertura de janelas, através das quais se realiza ventilação cruzada, o que acontece também no caso dos edifícios *Above Ground*.

Os edifícios das restantes tipologias *Earthship*, não possuem janelas em todas as fachadas, apenas na fachada voltada a sul, que são normalmente fixas na sua maioria, e correspondentes a apenas uma divisão da habitação, a zona verde, pelo que não é possível realizar uma ventilação cruzada eficaz. Assim, neste tipo de habitações, a ventilação processa-se através de condutas

de admissão de ar inseridas na fachada norte, enterrada, de onde é proveniente o ar mais fresco. Isto permite não só ventilar a casa como também arrefecê-la (Reynolds 1991).

As condutas de admissão de ar são constituídas por tubos de alumínio de cerca de 200 a 250 mm, onde é colocada uma rede fina para evitar a entrada de insetos e impurezas no edifício. Estas condutas possuem uma pequena comporta de madeira no interior do edifício que permite cessar a entrada de ar e ativá-la quando for necessário, ficando com o aspeto de um pequeno armário dentro da habitação (Reynolds 1991). Na Figura 2.8 é possível ver a parede exterior já construída onde se encontram inseridos os tubos de ventilação natural e as caixas em madeira onde serão fixadas as comportas de madeira.



Figura 2.8: *Parede exterior sem revestimento onde é possível ver os tubos de ventilação inseridos (Earthship Bioteecture Portugal 2017)*

Porém, as condutas de admissão por si só não são suficientes para que se realize a ventilação do edifício, é necessário também que o ar já presente no edifício seja extraído, para isso são colocadas claraboias que, à semelhança das condutas, podem ser abertas ou fechadas consoante a necessidade dos ocupantes (Reynolds 1991). Na Figura 2.9 é possível visualizar a localização das referidas claraboias numa cobertura *Earthship*.



Figura 2.9: Claraboia na cobertura para extração de ar iluminação interior (OKflyboy 2007)

2.4.3. Sistemas de produção de energia dos edifícios *Earthship*

Como já foi referido, o conceito *Earthship* abdica da energia proveniente da queima de combustíveis fósseis, obtendo-a através de fontes renováveis. As fontes renováveis podem ser hídricas, no caso da existência de uma queda de água ou riacho nas proximidades, eólica através de turbinas nas zonas mais altas e ventosas ou tirando proveito do sol (Earthship Biotechture 2017f).

Os sistemas que utilizam o sol como fonte de energia são os mais comuns e de possível utilização em qualquer localização geográfica. São eles o sistema solar térmico, para produção de águas quentes sanitárias (AQS) e o sistema fotovoltaico, para a produção de eletricidade. Estas são as típicas fontes de energia que mantêm um edifício *Earthship* em funcionamento.

Os painéis devem ser escolhidos e dimensionados consoante as necessidades energéticas do edifício, que variam com o número de ocupantes, devendo produzir o máximo percentual de energia para cobrir as necessidades, se possível a totalidade, conferindo-lhe a autonomia desejada.

Associado ao painel fotovoltaico estará um sistema de baterias que permitirá acumular energia produzida durante o dia, que não é gasta nas horas de luz, permitindo a sua utilização durante a noite, quando a energia necessária será superior, nomeadamente por questões de iluminação elétrica, o que não é necessário durante o dia devido à entrada de luz natural (Reynolds 1991).

Uma vez que a climatização deste tipo de edifícios é realizada por meios passivos (Reynolds 1991), os mesmos não necessitam de sistemas de climatização, pelo que, em teoria, só haverá necessidades energéticas para a preparação das águas quentes sanitárias. A energia solar deverá ser utilizada para suprir essas necessidades.

No entanto, existe a possibilidade de colocar uma fonte de calor a biomassa (por exemplo, lareira) nestas habitações, o que contribui para o seu aquecimento durante os períodos em que não há sol. Esta lareira pode ainda ser associada a um recuperador de calor, sendo o seu calor aproveitado para aquecer toda a casa e as águas quentes sanitárias. Apesar desta solução não estar incorporada no conceito base *Earthship*, esta é a mais eficaz para as regiões mais frias onde é mais difícil captar energia solar para aquecimento das águas ou para o aquecimento passivo do edifício, satisfazendo as necessidades dos ocupantes durante a estação de aquecimento (Reynolds 1991). A Figura 2.10 ilustra a presença de uma pequena lareira, de desenho invulgar, no interior de uma habitação *Earthship*, que poderia eventualmente ser associada a um recuperador de calor para potenciar os ganhos térmicos, caso fosse necessário.



Figura 2.10: Lareira de uma habitação *Earthship* (*Earthship Biotecture 2017e*)

O estudo elaborado ao longo desta dissertação não incorpora este tipo de solução, uma vez que em Portugal não existem zonas climáticas de temperaturas extremamente baixas ao longo do ano.

Contudo, estes sistemas podem ser implementados em edifícios construídos em zonas de climas extremamente frios, em que os ganhos solares não são suficientes para o aquecimento do edifício.

2.5. Produção de bens alimentares

As habitações Earthship possuem as condições adequadas na sua zona verde para a produção de bens alimentares próprios a partir de vegetação rasteira e árvores de pequeno porte nas suas células botânicas (Reynolds 2009).

A produção não é feita através de métodos exclusivos do conceito. São também utilizados métodos como os cultivos suspensos ou a aquaponia.

A aquaponia é o método de produção que conjuga a aquacultura, criação de peixes em viveiro, com a hidroponia, que é uma técnica de cultivo de plantas sem solo. Este é um sistema que implica reduzidos custos energéticos, mas não possibilita o reaproveitamento de águas cinzentas e necessita de legalização (Earthship Biotechnology Portugal 2016).

Este método de produção consiste na utilização da água dos peixes, que contém os seus dejetos, para fertilização das plantas cujas raízes se encontram em suspensão, apenas sustentadas por argila expandida, uma vez que os minerais presentes na água do viveiro são suficientes para estimular a produção destas plantas rasteiras, sem adição de adubos e fertilizantes químicos que poluem o solo e os lençóis freáticos. Esta técnica, permite ainda a possibilidade de criar peixes em viveiro para consumo (Earthship Biotechnology 2015).

2.6. Resistência ao fogo

Os pneus são materiais de elevada combustão, como tal, a resistência ao fogo é um parâmetro que requer atenção neste este tipo de habitações, uma vez que um dos principais materiais que constituem a envolvente exterior são os pneus.

Apesar da escassez de fontes bibliográficas e estudos relacionados com o assunto, sabe-se que uma parede de pneus não revestida não arde quando sujeita a chama intensa projetada. Juntando o revestimento, a dificuldade de esta arder é ainda maior.

Isto acontece porque, mesmo que o pneu arda, a terra compactada no seu interior forma blocos tão sólidos e rígidos que mesmo retirando o seu molde, neste caso o pneu, não se desintegram. O solo não arde, e confinado no interior da parede onde não ocorre circulação de ar, nomeadamente de oxigénio, a combustão não é alimentada sendo assegurada a permanência das paredes estruturais em caso de incêndio.

Uma situação que comprova este facto é o incêndio denominado *Hondo Fire* que foi um incêndio de grandes proporções de atingiu o Novo México no verão de 1996, no qual imensas habitações convencionais arderam totalmente.

Um edifício *Earthship* da região, que se encontrava ainda em fase de construção na época, foi também devastado pelas chamas ardendo todos os materiais convencionais nele utilizados, nomeadamente madeiras, vidros, isolamentos, entre outros, à exceção da parede de pneus e das latas de alumínio. Os materiais convencionais foram consumidos pelas chamas, já os materiais reciclados reaproveitados no contexto *Earthship* apenas se encontravam parcialmente danificados.

As estruturas que se mantiveram intactas foram reaproveitadas e o edifício foi parcialmente reconstruído tendo como base elementos construtivos afetados anteriormente pelas chamas que continuaram a desempenhar as suas funções da mesma forma (Biotecture 2012).

2.7. Caracterização das soluções construtivas

2.7.1. Parede exterior

a) Apresentação da solução construtiva

A solução para paredes exteriores de um edifício *Earthship* é constituída por terra compactada confinada por pneus reutilizados. Esta parede tem a capacidade de isolar termicamente o edifício através da junção adequada dos materiais que a constituem e confere-lhe ainda um particular bom desempenho perante catástrofes naturais e intempéries devido ao seu elevado peso e elasticidade (Reynolds 1990).

Os pneus utilizados e enviados para tratamento de fim de vida são facilmente acessíveis em praticamente todo o mundo, e Portugal não é exceção. A sua reutilização na construção é

importante para evitar a poluição por destruição dos pneus através da sua queima, uma vez que estes não são biodegradáveis. Por outro lado, a sua reciclagem resulta em potenciais impactos ambientais superiores aos que resultam da sua reutilização direta, ainda que para outra função. Assim, tendo em vista um novo destino de fim de vida para os pneus, eles são utilizados na construção como elemento de contenção de terra compactada no seu interior, de forma a se obterem autênticos blocos maciços de cerca de 120kg cada que, assentes sucessivamente, constituem uma parede estrutural de peso elevado (Earthship Bioteecture 2016a).

Os diâmetros e respetivas quantidades são definidos em projeto, sendo selecionados pneus de maior dimensão para a fundação da parede, prosseguindo-se depois em altura com um diâmetro menor mas constante (Earthship Bioteecture 2017h).

b) Materiais

Os materiais utilizados são os pneus usados, cuja robustez se mantém quase inalterável, a terra seca (saibro), argamassa de revestimento e tintas. No entanto, esta listagem pode ser aumentada para diferentes tipologias de edifícios *Earthship*. É o caso das *Earth Bermed* e as *Earth Sheltered* que, devido às suas fachadas enterradas requerem a colocação de isolamento térmico e de membranas betuminosas que impeçam a migração da humidade da terra para o interior do edifício.

Segundo o *Tire Building Code*, parte da legislação construtiva existente nos Estados Unidos da América, que é o equivalente nas normas europeias a um Eurocódigo mas relativo a construção com pneus, são normalmente utilizados pneus com dimensões entre R13 e R16, que são as disponíveis globalmente no mercado para viaturas ligeiras (Earthship Bioteecture 2017h). Em projeto, é importante ter em consideração que na mesma fiada da parede os pneus deverão ter as mesmas dimensões, portanto nesta fase devem ser quantificadas as dimensões de pneus necessários e as respetivas quantidades para ser feita uma seleção previamente estudada no depósito de pneus usados, escolhendo as quantidades de material de uma forma objetiva (Reynolds 1990).

A terra é utilizada para encher os pneus e, normalmente, utiliza-se a do local de implantação, daí que a escolha do terreno seja muito importante para que a esta não recaia num terreno saturado, de terra vegetal, própria para cultivo, que para além de ser difícil de compactar, causa problemas na movimentação das terras, na estabilização do próprio edifício e problemas de

humidade. A escolha do terreno deve recair sobre um terreno de saibro, o mais adequado ao tipo de construção, de forma a facilitar os movimentos de terras no terreno e a reduzir as deslocações necessárias ao transporte de terra. Devem ser evitados solos rochosos que requerem escavações dispendiosas.

É ainda utilizada lama para uniformizar a superfície, preenchendo os espaços vazios entre pneus antes da uniformização da superfície com argamassa de reboco e posterior pintura. No caso das *Above Ground*, ambas as superfícies da parede são revestidas e pintadas, nas *Earth Sheltered* e *Earth Bermed*, uma vez que as fachadas estão enterradas, apenas são revestidas e pintadas as superfícies interiores.

É possível utilizar os mais variados tipos de argamassas, cuja composição pode incluir desde as fibras naturais à cal, no entanto a escolha comum recai sobre aquela que possui um traço que traduza a utilização da menor quantidade de cimento possível e mesmo assim satisfaça a necessidade, uma vez que o grande objetivo é a redução de materiais poluentes para primeira utilização (Earthship Biotecture 2017h). Uma das grandes dificuldades relativamente ao revestimento dos pneus é a determinação da composição da argamassa adequada que melhor adira à borracha, porém em caso de destacamento do reboco existem processos construtivos que podem ajudar na resolução do problema.

Para o caso de as paredes exteriores possuírem função estrutural, junto com a terra compactada no interior dos pneus são colocados varões de aço de forma a manter a parede ereta e indeformável, aumentando a sua resistência. Estes varões são colocados nos pneus de fundação e em vigas de coroamento da parede (Earthship Biotecture 2017h).

Por opção, a face interior pode também ser revestida por painéis OSB ou de gesso cartonado para facilitar o acabamento interior e permitir a existência de uma espessura de caixa-de-ar para a instalação do sistema elétrico e de abastecimento e drenagem de águas (Earthship Biotecture 2016b).

c) Processos construtivos

Na construção deste tipo de paredes, a terra é compactada no interior dos pneus manualmente até que estes fiquem cheios e totalmente rígidos. É fundamental a colocação de terra seca no seu interior e que esta seja afastada da humidade durante os trabalhos de compactação, uma vez

que a água contida na terra, quando evapora deixa um volume de vazios considerável no interior de cada pneu que acaba por provocar assentamentos indesejados a curto prazo.

Inicialmente, na sua base são colocadas duas fiadas de cartão reciclado ou canelado cruzadas, provenientes de caixas de cartão usadas, com o objetivo de impedir que a terra saia por baixo do pneu ao longo da sua colocação. É utilizado o cartão, como poderia ser utilizado um contraplacado, por exemplo, no entanto o cartão abrange a vertente do reaproveitamento de resíduos, tem boa resistência à tração e é moldável e de fácil manuseamento, não implicando a utilização de instrumentos de corte ou mão-de-obra adicional para moldar os materiais para essa função e é fácil de colocar (Earthship Biotechture 2016b).

Os pneus cheios de terra são assentes em fiadas horizontais com juntas verticais desalinhadas, sendo compactados um a um, tal como acontece no processo construtivo das alvenarias em tijolo cerâmico, assim, o centro de cada pneu deve ser alinhado com a junta entre os dois pneus da camada inferior. Estes devem ser encostados uns aos outros, uma vez que os mesmos são simplesmente apoiados entre si, mantendo a sua forma devido ao peso próprio e não existe nenhum material que una as suas juntas, vedando-as (Earthship Biotechture 2017h). Na Figura 2.11 é possível observar o aspeto de uma parede deste tipo em construção e a disposição das suas fiadas ainda antes da colocação dos revestimentos.



Figura 2.11: Parede exterior em construção (keywordsking 2017)

As primeiras duas fiadas de pneus constituem a fundação e devem ser colocadas numa vala, que pode ser apenas de terra compactada sendo que deve ser assegurado o nivelamento e solidez da sua base, ou poderá ser coberta por betão antes da colocação dos pneus, sendo esta opção considerada de acordo com o tipo de terreno do local onde será feita a obra. Dentro desta vala deverá ser colocada uma membrana betuminosa para posterior assentamento das duas fiadas de pneus de maior diâmetro, abaixo do nível da soleira do cabouco (Earthship Biotecture 2016a). O diâmetro das fiadas que se sucedem deverá ser menor e constante ao longo de toda a altura da parede (Earthship Biotecture 2017h).

O trabalho de compactação requer esforço físico da parte de equipas de 2 trabalhadores, nas quais um vai colocando a terra no interior do pneu com o auxílio de uma pá e o outro vai empurrando e compactando essa terra em direção às bordas interiores dos pneus, que são zonas de difícil acesso à entrada da terra, de forma manual com a ajuda de uma marreta. Devido ao elevado esforço físico da tarefa, os trabalhadores devem periodicamente alternar a posição de trabalho e, ao compactar a terra deverão manter a base do corpo estável movimentando apenas os braços, deixando que o peso próprio da marreta compacte a terra. Perto do fim do enchimento total do pneu, a sua posição deve ser ajustada, empurrando-o ainda antes que atinja seu peso bruto final, uma vez que as deslocções à sua volta para a execução da compactação do seu interior resultam num desajuste da sua posição. Uma vez verificado que a borracha do pneu não cede ao toque, o pneu estará praticamente concluído e será fechado com a ajuda de um compactador manual para uniformizar a superfície, que deve estar devidamente nivelada e ajustada para o posterior assentamento de outros pneus. Desta forma, um pneu demorará 12 minutos a ser finalizado e o produto final será um bloco rígido de terra envolto por um pneu, com um peso de cerca de 120kg (Earthship Biotecture 2016a).

O esquema ilustrado na Figura 2.12 representa de uma forma resumida o processo acima descrito.

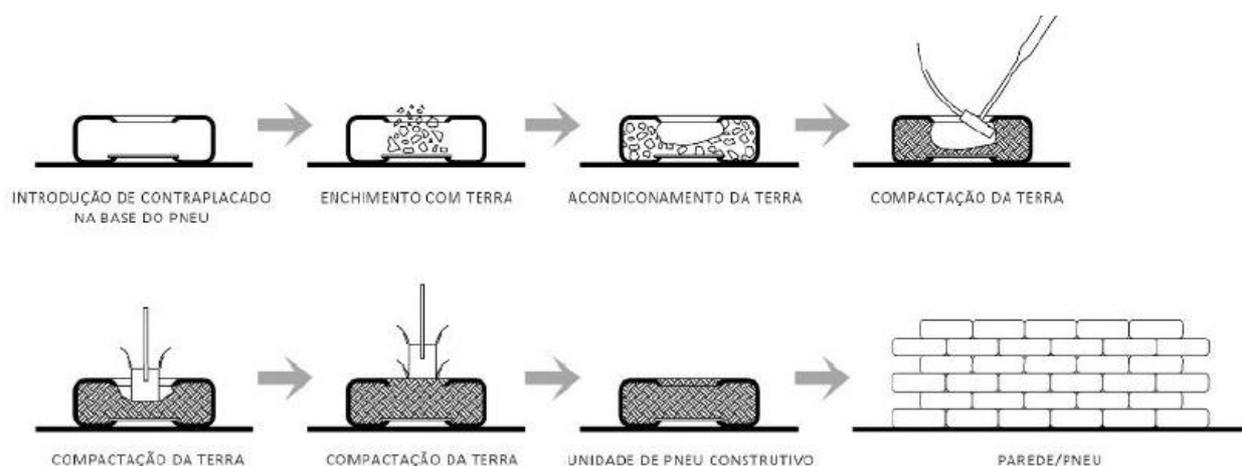


Figura 2.12: Esquema descritivo da construção de uma parede exterior (Earthship Biotecture 2016a)

Os pneus das fiadas mais elevadas serão sempre trabalhados pelo processo descrito, porém o trabalhador deverá dispor de estruturas especializadas para o trabalho em altura e a terra a colocar nos pneus deverá encontrar-se elevada, à altura do trabalho a efetuar, na pá da escavadora, para que possa ser prontamente colocada de forma prática no interior dos pneus.

O assentamento natural dos pneus causa um recuo da parede, que gera nesta um desalinhamento entre a base e o topo de cerca de 13 mm por fiada. Este desalinhamento pode pôr em causa a estabilidade da parede quando esta não é construída como uma parede de encosto. Como tal, é necessário nivelar verticalmente e horizontalmente a parede à medida que ela é construída, porém, caso esta se incline para fora, e fique apoiada numa encosta térrea com inclinação no sentido oposto, sendo, portanto, uma parede de encosto, este desalinhamento pode ser vantajoso em termos de estabilidade estrutural devido à ação do peso próprio do terreno na parede que a estabiliza funcionando como um contrapeso. Esta situação de inclinação vantajosa verifica-se para edifícios *Earth Bermed* e *Earth Sheltered*, sendo que o alinhamento deve ser verificado com mais rigor em edifícios do tipo *Above Ground* (Earthship Biotecture 2017h).

Para assegurar a estabilidade das paredes de pneus são colocados varões de aço na base ao longo de 3 ou 4 fiadas no interior da terra compactada. Pode também ser colocada uma viga de coroamento na parte superior, que funciona como uma cinta de amarração das paredes. Esta é executada pela colocação de varões de aço a perfurar as 3 fiadas superiores, que servem para apoio da cinta a colocar (Earthship Biotecture 2017h). Os espaços resultantes entre a fiada do topo e as vigas que suportam a cobertura constituem pormenores construtivos que podem ser

executados com latas ou garrafas de vidro de forma semelhante às paredes interiores. Um exemplo da construção deste tipo de pormenor construtivo é apresentado na Figura 2.13.



Figura 2.13: Pormenor construtivo das juntas entre o topo das paredes e a cobertura (Earthship Biotecture Portugal 2017)

Uma vez que os pneus são assentes em fiadas com as juntas verticais desalinhadas, é natural que chegando ao fim da parede os pneus se encontrem desencontrados com alternância entre pneus e espaços vazios. Para contrariar este facto recorre-se à chamada técnica *half-tire* - a técnica do meio pneu (Earthship Biotecture 2017h). Esta técnica consiste no corte de um pneu com o auxílio de uma rebarbadora ou uma tesoura grande para corte de arame, abrindo-o totalmente como se de uma tira de borracha se tratasse. O pneu, aberto, é colocado a “abraçar” o pneu anterior da sua fiada até ficar alinhado com o último pneu da fiada de baixo, sendo depois fixado ao pneu anterior com parafusos. Encontrada a posição correta do pneu, repete-se o processo de enchimento e compactação da terra de forma semelhante à dos pneus inteiros (Earthship Biotecture 2016a). A Figura 2.14 ilustra a aplicação desta técnica.



Figura 2.14: Representação da aplicação da técnica *half-tire* em obra (Earthship Biotecture 2016a)

Como já foi referido, para a estabilidade da parede ser assegurada, a altura não deve ultrapassar os 3,5 metros, sendo 3 metros o pé-direito aconselhável, mas podendo e devendo ser adotadas medidas ainda mais conservativas consoante a sua espessura (Earthship Biotecture 2017h).

Os espaços vazios entre pneus ao longo da altura da parede são preenchidos com lama, e por vezes com latas de alumínio, ou argamassa de forma a atenuar a irregularidade da parede devido à curvatura dos pneus. Em seguida, estando a parede nivelada verticalmente de acordo com a face dos pneus, é colocada uma rede de galinheiro aparafusada aos pneus para melhor colocação e fixação da argamassa de reboco para o acabamento da superfície para posteriormente pintar (Reynolds 1990).

d) Aparência

O aspeto do acabamento deste tipo solução depende muito do desenho definido em projeto. Pode ser revestida por argamassa até se obter um acabamento liso e uniforme das superfícies ou pode ser revestida acompanhando as curvaturas dos pneus para criar ondulações na parede, como se pode observar na Figura 2.15.



Figura 2.15: Aspeto de uma parede exterior com as ondulações dos pneus visíveis (Karuna Farm 2014)

Pode ainda ser decorada com latas ou garrafas de vidro pela parte exterior, como exemplificado no seguinte subcapítulo relativo à construção de paredes interiores.

É ainda importante referenciar que será visivelmente notório que a parede exterior terá uma espessura considerável visível nos arcos das portas e janelas.

2.7.2. Paredes interiores

a) Parede interior de latas

a.1) Apresentação do sistema construtivo

Nas soluções das paredes divisórias das habitações Earthship são incorporadas latas de refrigerante ou garrafas de vidro assentes com argamassa. Este tipo de materiais é facilmente encontrado em todo o mundo, nomeadamente em Portugal, constituindo uma percentagem considerável dos resíduos produzidos no planeta e enviados para reciclagem ou aterro. Como tal, o seu reaproveitamento na construção é importante para o ambiente na medida em que evita a sua deposição ao longo de anos até à sua total degradação na natureza que pode demorar entre 100 a 500 anos (Lipor 2017). A construção com latas é simples e resulta em paredes leves e, segundo o autor do conceito, com bom desempenho acústico (Reynolds 1990).

a.2) Materiais

Os materiais utilizados são latas de alumínio, argamassa para assentamento das latas e reboco das superfícies, e tinta. As latas utilizadas para o efeito devem ser recolhidas intactas e devem ser as *standard* de 12,4 cm de altura e 6 cm de diâmetro da base (Earthship Bioteecture 2016b).

Este tipo de paredes não possui isolamento, uma vez que o conceito não possui requisitos acústicos de interior e o ar contido nas latas já contribui por si só para um bom desempenho acústico deste tipo de paredes.

Contudo, caso se opte pela construção de paredes divisórias de gesso cartonado ou painéis OSB, é possível introduzir algum tipo de isolamento no seu interior, sendo o seu processo construtivo o convencional através da aplicação de perfis metálicos.

a.3) Processos construtivos

As latas de alumínio são assentes com argamassa em fiadas horizontais, desencontradas, com as juntas verticais com a sua maior dimensão normal à direção da parede. Por desencontradas entende-se que, numa fiada de latas, estas alternam a sua posição, ficando a face da base da lata virada para uma das superfícies da parede e a lata seguinte com o topo virado para essa mesma superfície, e assim sucessivamente de forma

alternada. Entre elas deverá haver pelo menos um dedo de espaço para garantir que existe argamassa suficiente para permitir a integridade da parede (Reynolds 1990).

A disposição das latas na parede é perceptível pela representação do processo construtivo da parede em obra na Figura 2.16.



Figura 2.16: Parede interior de latas em construção (Earthship Biotechnology Portugal 2017)

Antes de assentar as latas na argamassa convém que estas sejam ligeiramente amolgadas na face cilíndrica de forma a criar uma superfície pontiaguda na base de assentamento que suporta melhor a lata na argamassa. Caso não seja objetivo utilizar as latas visíveis como revestimento da parede, procede-se à uniformização da superfície com argamassa de reboco como é também ilustrado na Figura 2.16. para posteriormente ser pintada.

Caso as latas fiquem visíveis, recomenda-se a aplicação de um produto que as proteja dos efeitos da corrosão (Earthship Biotechnology 2016b).

a.4) Aparência

A aparência deste tipo de paredes é semelhante à das paredes interiores convencionais quando se opta pelo acabamento liso e uniforme da superfície e posterior pintura.

No caso de se optar por deixar as latas visíveis o aspeto será uma parede de superfície irregular como se pode verificar na Figura 2.17.



Figura 2.17: *Superfícies interiores inacabadas que apresentam o aspeto de um acabamento de parede interior com as latas visíveis (Earthship Biotecture 2017j)*

Ao contrário das paredes exteriores, estas possuem uma espessura semelhante à das soluções convencionais, uma vez que a lata possui cerca de 12,4 cm de altura, contando com as restantes camadas, a parede não terá mais de 15 cm de espessura (Earthship Biotecture 2016b).

b) Parede interior de garrafas de vidro

b.1) Apresentação da solução construtiva

As paredes interiores *Earthship*, tal como foi anteriormente referido, para além de poderem ser constituídas por latas, podem também integrar garrafas de vidro, permitindo a passagem da luz entre divisões da habitação e criando formatos decorativos coloridos nestas soluções construtivas.

Este reaproveitamento é vantajoso para o ambiente na medida em que o vidro constitui uma percentagem considerável dos resíduos produzidos a nível mundial cujo fim de vida é usualmente a deposição, que durará até 1 milhão de anos até que este material se degrade na natureza (Lipor 2017).

b.2) Materiais

Os materiais utilizados são garrafas de vidro e argamassa de assentamento. A quantidade de garrafas deve ser definida em projeto assim como as respetivas cores para que se proceda à seleção dos resíduos nas entidades de tratamento e recolha.

b.3) Processos construtivos

As garrafas de vidro são assentes e dispostas de forma semelhante às latas de alumínio, no entanto, as garrafas não são colocadas inteiras, sendo cortadas pela sua parte cilíndrica regular e excluindo a parte do gargalo da garrafa. Duas metades de garrafa são emparelhadas e fixas com fita adesiva, tal como ilustrado na Figura 2.18. a), de forma a quando estas forem assentes com argamassa, faces semelhantes da garrafa apareçam em ambas as superfícies da parede como é possível verificar na Figura 2.18. b). Assim, as paredes interiores constituídas por garrafas de vidro possuem uma espessura igual à altura das duas meias garrafas cortadas (Reynolds 1990).



a)

b)

Figura 2.18: Metades de garrafas cortadas e unidas com fita adesiva prontas a colocar na parede - a) (Earthship Biotechture Portugal 2017), e parede interior em construção onde é possível verificar que as metades das garrafas se encontram unidas com fita adesiva - b) (SERREBROOKE 2017)

Tal como na construção das paredes interiores de latas, é necessário assegurar que existe pelo menos um dedo de argamassa entre as garrafas de forma a assegurar a integridade da parede.

b.4) Aparência

A aparência desta solução construtiva varia muito consoante a idealização feita em projeto. O emparelhamento das garrafas permite a passagem de luz entre divisões através das garrafas, criando um efeito decorativo e tornando as paredes que constituem em vitrais através da combinação de garrafas de vidro de diferentes cores, como é possível verificar na Figura 2.19. a). Este tipo de solução construtiva apresenta diferentes variações consoante o gosto do dono de obra, podendo as cores variar ou manterem uma única tonalidade, como no caso ilustrado na Figura 2.19. b), no entanto a função divisória e de translucidez mantém-se inalterável.



Figura 2.19: Parede constituída por garrafas de vidro de diferentes cores -a) (Earthship Biotecture 2017d); e de garrafas de vidro do mesmo tom -b) (Hippy 2015)

As paredes não necessitam de ser totalmente constituídas por garrafas de vidro. As garrafas podem ser combinadas com latas na solução construtiva que integram, tornando-a parcialmente translúcida na intenção de permitir a passagem da luz apenas em sítios específicos da parede, como é ilustrado no exemplo da Figura 2.20.



Figura 2.20: Divisão em que se verificam paredes parcial (à esquerda, em primeiro plano) e totalmente (à direita, em segundo plano) constituídas por garrafas e vidro, respetivamente (Bryan Welch 2009)

Uma vez que é necessária a entrada de luz nas casas de banho, mas não é possível colocar janelas comuns respeitando a privacidade entre os moradores, uma boa solução a adotar é uma parede de garrafas de vidro, que impede a visibilidade para seu o interior. Estas para além de iluminar este compartimento irão funcionar como substitutas das paredes convencionais revestidas a azulejos, sendo também de fácil limpeza e manutenção. Na Figura 2.21 é possível observar um exemplo de um quarto de banho constituídos apenas por paredes de garrafas de vidro.



Figura 2.21: Paredes de garrafas de vidro no quarto de banho (Earthship Biotope 2017j)

Para além dos exemplos de aplicação já referidos no que diz respeito às garrafas de vidro, estas podem também servir para fazer cúpulas ou outros elementos decorativos em contacto com o exterior que permitam a entrada de luz solar ou até mesmo exteriores, como a estrutura peculiar da *Earthship* da Figura 2.22, que funciona como um candeeiro que ilumina o exterior da habitação dando ao edifício uma aparência bem distinta da convencional.



Figura 2.22: Habitação Earthship com pormenor de candeeiro exterior de garrafas de vidro (The owner-builder network: The DIY Community 2017)

2.7.3. Pavimentos

a) Apresentação da solução construtiva

Os pavimentos dos edifícios *Earthship* são constituídos por soluções construtivas convencionais. Os revestimentos, tal como nos edifícios convencionais, podem ser em pedra, cerâmica, madeira ou qualquer outro tipo. Apenas deve ser aplicado ao pavimento o material necessário de acordo com o tipo de revestimento a colocar e assegurar a colocação dos isolamentos necessários à construção assente diretamente sobre o terreno, uma vez que normalmente são edifícios de apenas um piso, o piso térreo (Reynolds 1990).

Sendo este um sistema construtivo semelhante ao convencional, é assegurada a disponibilidade dos materiais em Portugal.

b) Materiais

Os materiais utilizados para executar o pavimento de uma *Earthship* são essencialmente os constituintes do betão (água, areia, cimento) para formação da betonilha de regularização, rede eletrossoldada, membrana betuminosa e os materiais definidos em projeto para o revestimento do pavimento, assim como os materiais necessários à sua respetiva colocação, tais como argamassa de colagem, ripas de madeira, entre outros.

Devem ainda ser requisitados equipamentos de compactação mecânica, como um cilindro de compactação, compactadores de percussão ou placas vibratórias para nivelamento do terreno sobre o qual será construído o pavimento térreo.

c) Processos construtivos

Inicialmente é necessário compactar a terra do piso térreo de forma mecânica, com um cilindro de compactação por exemplo, de forma a deixar a superfície devidamente rígida e nivelada.

Em seguida, sobre a terra compactada é colocada uma membrana betuminosa para impedir a ascensão da humidade proveniente do terreno através do pavimento. Em terrenos mais húmidos, o aconselhável é a criação uma superfície drenante de gravilha antes da construção do pavimento, para manter a água do solo afastada do edifício, pelo rebaixamento do nível freático, permitindo-lhe circular e encaminhando-a para longe, e assim evitando a ascensão desta ao edifício por efeito de capilaridade. No entanto, este procedimento não deverá ser necessário,

uma vez que terrenos muito húmidos não são uma escolha adequada para este tipo de construções.

Sobre a membrana é posteriormente colocada uma rede eletrossoldada que é coberta com betonilha de regularização com, no mínimo, 20 cm de espessura, que deverá conferir um pavimento nivelado e preparado à colocação do revestimento escolhido para acabamento final. Este revestimento pode ser dos mais diversos tipos.

Assim, no caso de um pavimento com revestimento em ladrilhos cerâmicos, sobre a betonilha seria apenas colocada argamassa de colagem para que fossem fixados os ladrilhos, o mesmo aconteceria para a pedra. Já no caso de o pavimento ser em madeira, sobre a betonilha são colocadas ripas de madeira para assentamento do revestimento e, entre elas, placas de aglomerado de cortiça para um melhor isolamento térmico e a sons de percussão.

d) Aparência

A aparência do pavimento depende essencialmente do revestimento escolhido para o seu acabamento, contudo, a sua aparência é muito semelhante à dos pavimentos tradicionais. Na Figura 2.23 é possível ver um pavimento de madeira em a), um de pedra em b) e um de cerâmica c), respetivamente, aplicados em diferentes edifícios *Earthship*, confirmando as semelhanças com o sistema convencional.



a)



b)



c)

Figura 2.23: Pavimento em madeira- a), pavimento em pedra- b) e pavimento cerâmico- c)
(*Earthship Bioteecture 2017j*)

2.7.4. Cobertura

a) Apresentação do sistema construtivo

A cobertura *Earthship* varia consoante a tipologia do edifício. Para edifícios de tipologia *Earth Bermed* e *Above Ground* é muito semelhante às tradicionais exceto no seu revestimento, pois enquanto as coberturas convencionais em Portugal são revestidas a telha cerâmica ou cobertas de gravilha no caso de serem coberturas planas, as utilizadas em contexto deste conceito são revestidas em chapa lacada nervurada, normalmente de cor verde, ou materiais reciclados equivalentes, ou pode ser ajardinada mas nunca coberta por um manto de terreno, já que este é o fator diferencial característico das habitações *Earth Sheltered*.

A cobertura *Earth Sheltered* difere totalmente das tradicionais, sendo o seu constituinte maioritário o seu revestimento em terra, o que confere aos edifícios a sua camuflagem no local de implantação, difundindo-a com o terreno circundante e tornando o ambiente no seu interior ameno em climas muito quentes.

Assim, sabe-se que todos os materiais utilizados para a constituição de todos os tipos de coberturas inseridas neste conceito estão disponíveis em Portugal.

b) Materiais

A típica cobertura deste tipo de edifícios é suportada por vigas de madeira devidamente tratada (Earthship Biotecture 2017b), ou por uma estrutura de betão armado em casos como os anteriormente citados. O revestimento interior é composto por painéis OSB e para o isolamento são colocadas placas de isolamento térmico de poliestireno extrudido (XPS) (Earthship Biotecture 2016b). A esta sucede-se a colocação de uma tela impermeabilizante para impedir que a humidade exterior atravesse a cobertura e penetre no edifício. No revestimento exterior, a tradicional telha é substituída por chapa lacada nervurada, usualmente de cor verde, no entanto podem ser utilizadas chapas provenientes de eletrodomésticos usados, como é o caso de parte da cobertura do edifício apresentado na Figura 2.24, que possui chapas de diferentes cores no seu revestimento provenientes de equipamentos em fim de vida (Audrey Wright 2014), sendo as restantes do tipo anteriormente referido (Earthship Biotecture 2017i).



Figura 2.24: Cobertura de edifício Earthship onde é possível distinguir dois tipos de revestimento: chapa lacada e chapas provenientes do fim de vida de eletrodomésticos (Audrey Wright 2014)

No caso das coberturas *Earth Sheltered*, as chapas utilizadas no revestimento são trocadas pela terra que deverá ser colocada numa camada de pelo menos um metro. Isto implica um reforço a nível de materiais de impermeabilização para evitar a penetração de humidade do terreno.

c) Processos construtivos

Sobre as vigas são colocados painéis de lamelas longas de madeira orientadas (placas OSB), sobre as quais assentam as placas XPS para isolar a cobertura termicamente.

Uma vez colocado o isolamento térmico, é sobre ele estendida uma membrana betuminosa para impedir a infiltração de água no interior do edifício através do revestimento da cobertura. O revestimento em chapa lacada nervurada é fixado às madres de madeira ou vigas de betão, com as placas XPS entre elas confinadas (Earthship Bioteecture 2017i).

No caso de edifícios *Earth Sheltered* a membrana betuminosa deve ser emendada com a membrana que protege as paredes de fachada enterradas de forma a impedir infiltrações em ambas as soluções construtivas através da terra. Após a colocação da membrana a terra é colocada em camadas que são compactadas individualmente até se atingir uma camada de um metro de espessura. As últimas camadas de terra deverão ser de terra vegetal caso o objetivo seja a proliferação da vegetação.

d) Aparência

A aparência é semelhante à das coberturas convencionais de revestimento em chapa, apesar de estas não serem muito comuns nas habitações em Portugal. No entanto, a sua cor pode variar consoante a preferência e as definições de projeto, sendo tipicamente utilizada a de cor verde. O acabamento liso do revestimento em chapa nervurada confere um bom escoamento das águas pluviais a este tipo de coberturas. A Figura 2.25 ilustra uma típica cobertura *Earthship* em chapa lacada nervurada de cor verde, utilizada em construções *Earth Bermed* e *Above Ground*.



Figura 2.25: Cobertura em chapa lacada (Andrew Elliot 2013)

A aparência de uma cobertura *Earth Sheltered* é de difusão do edifício no terreno, através da sua camuflagem com vegetação, integrando o edifício na paisagem e fazendo-o passar despercebido. Um exemplo deste tipo de cobertura encontra-se ilustrado na Figura 2.26, onde é possível verificar a sua harmonia com a paisagem.



Figura 2.26: Edifício *Earth Sheltered* onde é perceptível o efeito de camuflagem da cobertura ajardinada na paisagem (Custom Earth Sheltered Construction 2009)

3. CASOS DE ESTUDO

Para uma análise aprofundada, com vista à satisfação dos objetivos inicialmente propostos nesta dissertação, são definidas soluções construtivas padrão de uma habitação *Earthship*, construída segundo o Modelo Global e inserida na tipologia *Earth Bermed*. Serão excluídos desta análise os edifícios do tipo *Earth Sheltered* e *Above Ground*, uma vez que as soluções são em geral muito semelhantes e, numa fase posterior, as soluções definidas serão objeto de análise comparativa com um edifício convencional corrente. Assim, a comparação deve ser feita entre o modelo funcionalmente mais eficaz criado pela *Earthship Bioteecture*, o Modelo Global, construído sobre o piso térreo, e um edifício convencional construído segundo as mesmas condições.

As soluções construtivas convencionais adotadas serão também descritas ao longo deste capítulo e serão integradas como soluções do mesmo edifício descrito em planta na Figura 3.1, porém não possuem fachadas enterradas como nela se encontra representado, uma vez que estas se inserem apenas no conceito *Earthship*, de acordo com o qual o projeto foi encomendado originalmente.

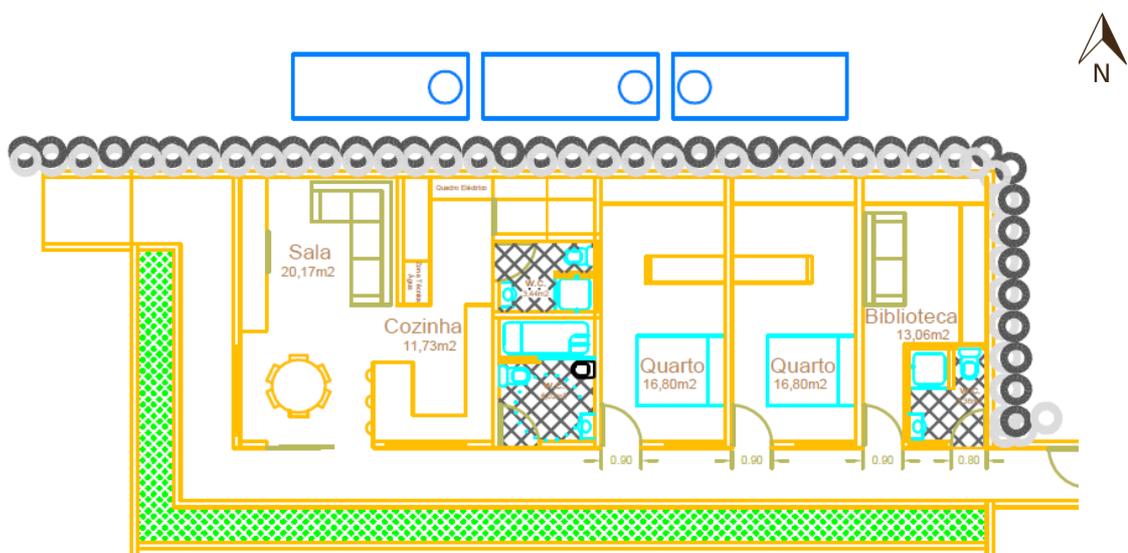


Figura 3.1: Planta do caso de estudo (*Earthship Bioteecture Portugal 2015*)

A planta parcial apresentada na Figura 3.1 remete a um caso de estudo real de um edifício *Earthship*, construído segundo o Modelo Global, de tipologia T3 que se encontra em fase de construção na Madeira. A habitação é constituída por duas zonas principais: a zona de conforto e a zona verde.

A zona de conforto, com 104,56 m² de área útil de pavimento, é a zona habitável do edifício, onde se encontram as divisões funcionais da casa, os sistemas e equipamentos, entre outros. A zona verde corresponde à entrada na habitação, que funciona como um corredor de acesso às divisões da zona de conforto. Esta é uma zona envidraçada, que funciona como agente do aquecimento passivo do edifício, propícia ao crescimento de vegetação para consumo próprio dos habitantes. Esta zona aquece de forma semelhante a uma estufa transmitindo o calor gerado no seu interior para o interior da zona de conforto onde fica retido devido à forte capacidade térmica das paredes de fachada constituídas e revestidas por terra, segundo o projeto original. Um dos objetivos desta dissertação é inclusive comprovar este fenómeno e comparar a capacidade de retenção do calor no edifício entre sistemas convencionais e *Earthship*, através da sua análise térmica e funcional efetuada nos capítulos seguintes.

A zona verde, de 60,06 m² de área útil de pavimento, é revestida a janelas numa área envidraçada total de 93,11 m², na sua maioria fixas, de vidro duplo e caixilharia em madeira nas faces em contacto com o exterior, ligeiramente inclinadas para melhor exposição solar. Encontram-se posicionadas à face exterior da parede e considera-se que dispõem de estores venezianos colocados na caixa-de-ar dos vidros duplos como dispositivo de oclusão noturna, no entanto isto é um fator totalmente opcional no que toca à fidelidade ao conceito *Earthship* original, porém foi considerado, uma vez que a sua existência é imposta como um fator de cálculo.

A divisão entre a zona verde e a zona de conforto é constituída por envidraçados em vidro simples e caixilharia de madeira, que facilitam as trocas de calor e permitem a entrada de luz natural para iluminação da zona de conforto.

No Anexo I encontra-se uma tabela resumo onde se encontram quantificadas as dimensões do edifício, bem como as áreas totais correspondentes a cada tipo de solução construtiva.

3.1. Soluções construtivas da versão Earthship

3.1.1. Parede exterior

A parede exterior *Earthship* é constituída por pneus, cujo constituinte principal é a borracha de butadieno extrudido, com terra compactada no seu interior, colocados em fiadas horizontais com juntas verticais desalinhas, de acordo com o processo descrito no capítulo anterior (P.da S. Shiraishi et al. 2017).

O assentamento natural dos pneus causa um recuo da parede, que deverá gerar um desalinhamento entre a sua base e o topo de cerca de 13 mm por fiada. Tal como já foi referido, este desalinhamento acaba por conferir mais estabilidade à parede, uma vez que esta se inclina para fora, ficando em contacto com a encosta térrea que a reveste e que possui inclinação no sentido oposto, tornando-a numa parede de encosto. Para esta estabilidade ser assegurada, a altura da parede não deve ultrapassar os 3,5 metros, assim sendo, para este edifício foi considerado um pé-direito conservativo de 2,70 metros tendo em consideração que este é constituído por apenas um piso (Earthship Bioteecture 2017i). O desalinhamento referido é perceptível na representação esquemática da solução construtiva do Anexo II.

Os pneus podem ter vários tamanhos, assim, os diâmetros em circulação mais comuns para automóveis, e utilizados em edifícios *Earthship*, como foi referido anteriormente, são os R13, R14, R15 e R16, sendo cada número referente ao diâmetro da jante (circunferência interior do pneu) em polegadas (Earthship Bioteecture 2017i). Como tal, serão analisadas quatro paredes exteriores, entre as quais apenas a espessura difere devido a esse mesmo diâmetro. No entanto, na prática, são definidos diâmetros maiores em projeto para os pneus da fundação da parede, prosseguindo-se depois em altura com um diâmetro menor, mas constante, sendo por isso normalmente utilizados por habitação apenas dois diâmetros diferentes.

Uma vez construída a parede de pneus, é necessário assegurar que no exterior destas, sendo esta uma habitação *Earth Bermed*, encontra-se um metro de espessura de terra seca que deverá ser gradualmente elevado do piso térreo até ao topo do edifício, deixando subterradas as paredes de fachada que delimitam a zona de conforto. A cobertura não é coberta por terra de modo a funcionar como um ponto de recolha das águas pluviais para assegurar o abastecimento do edifício.

A delimitar a espessura de 1 m de terra do piso térreo à cobertura, existe uma camada de isolamento térmico, em placas XPS de 6 cm de espessura, e uma membrana betuminosa colocada posteriormente. Estas duas camadas de material devem ser colocadas até coincidirem com as faces do edifício, isto é, a camada de terra de 1 metro de espessura deve ser isolada termicamente e contra a humidade no seu topo também, de forma a impedir a infiltração de águas pluviais nessa espessura em todo o contorno da habitação, afastando-a totalmente da humidade e mantendo a camada de terra contida nesse perímetro seca.

Sobre a membrana betuminosa é colocada posteriormente uma encosta de terra vegetal sob a qual se encontram enterrados os reservatórios onde se armazenam as águas pluviais recolhidas. Esta terra é húmida e está sujeita às intempéries, sendo necessária a colocação da membrana betuminosa e do XPS entre esta e a camada de terra seca de forma a evitar a proliferação da humidade, no entanto, sendo isolada, contribui para a proteção da parede relativamente aos fenómenos atmosféricos.

a) Seleção dos pneus e volumes de terra

Existem inúmeros tipos de pneus, não só no que diz respeito à sua constituição, mas também às suas dimensões, finalidade, entre outros. Facto é que a sua desintegração na natureza não se desencadeia por processos naturais, mas sim através de processos que implicam gastos energéticos e libertação de poluentes, daí que a sua reutilização e reciclagem sejam medidas sustentáveis para o ambiente.

Em projeto, devem ser especificadas as dimensões de pneus necessários e as respetivas quantidades para ser feita uma seleção pensada e focada na recauchutagem. É importante ter em consideração que, na mesma fiada os pneus deverão ter as mesmas dimensões, exceto para certas imposições arquitetónicas no qual poderão variar no diâmetro, no entanto, a sua largura (L) deverá ser constante por fiada para assegurar a regularidade geométrica da parede.

Analisando a geometria de um pneu, sabe-se que para os pneus convencionais a largura do pneu (L) pode variar entre 18,5 cm e 22,5 cm, sendo em Portugal a largura mais comum 19,5 cm. Por uma questão de simplificação e de abranger todos os valores, será considerado o valor médio das larguras disponíveis no mercado, que é de 20,5 cm (Earthship Biotecture 2016b). Para efeitos de cálculo ao longo desta dissertação, considera-se pneus R14 para as paredes

exteriores, excluindo as duas fiadas de fundação, que serão R15, e para todos os pneus, um peso médio de 6,25kg (P.da S. Shiraishi et al. 2017).

A Figura 3.2 esquematiza as diferentes dimensões de um pneu, atribuindo-lhe uma denominação.

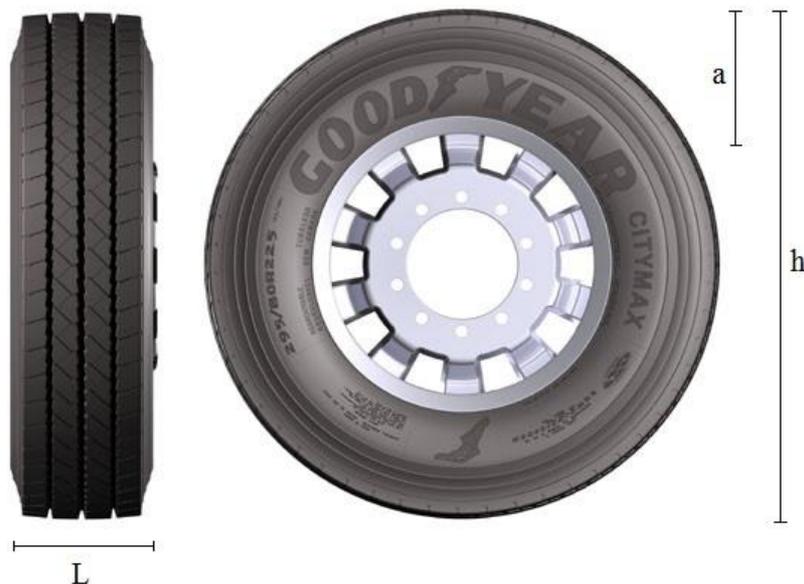


Figura 3.2: Esquematização de um pneu

A espessura entre a face de contacto do pneu e a jante (a) corresponde a metade da sua largura (L), como tal, mede 10,25 cm, considerando o valor médio de L . O que implica que a altura de um pneu será igual ao diâmetro da jante de cada tipo de pneu somada a duas vezes a espessura (a), ou seja, a altura da jante mais a largura do pneu, que é o dobro da espessura (a) (BFGoodrich- Tires 2016).

O volume de terra compactada no interior de um pneu, será aproximadamente igual ao seu volume interior. Para efeito dos cálculos seguintes será considerado que a espessura da borracha de um pneu é de aproximadamente 5mm e que 1 polegada corresponde a 2,54 cm.

Em seguida apresenta-se a metodologia de cálculo para a obtenção do volume de terra de um pneu, tendo por base as suas medidas conhecidas. O exemplo apresentado é válido para pneus R13, sendo os restantes volumes obtidos pelo mesmo procedimento e apresentados na Tabela 3.1.

O diâmetro da jante, tendo em conta a sua nomenclatura, mede 13 polegadas, o que em centímetros equivale ao seguinte valor determinado pela expressão 3.1.

$$D = 13 \times 2,54 = 33,02 \text{ cm} \quad (3.1)$$

Sendo $a = 10,25 \text{ cm}$ e $L = 20,5 \text{ cm}$, então o valor da espessura da camada de terra na parede será obtida através da expressão 3.2.

$$\begin{aligned} h &= 33,02 + 2 \times 10,25 \approx 53,42 \text{ cm} \rightarrow e = h - 2 \times 0,5 \text{ cm} = 53,42 - 1 \\ &= 52,42 \text{ cm} \end{aligned} \quad (3.2)$$

Por conseguinte, o volume de terra no interior de cada pneu, é calculado pela expressão 3.3.

$$V_{\text{terra}} = \frac{52,42^2 \pi}{4} \times 20,5 = 44242,3 \text{ cm}^3 = 0,04424 \text{ m}^3 \quad (3.3)$$

Na Tabela 3.1, apresentam-se os resultados obtidos pelo procedimento anteriormente descrito para todos os pneus considerados como de possível aplicação a este conceito.

Tabela 3.1: *Volumes de cada pneu*

Pneu	D (cm)	a (cm)	L (cm)	e (cm)	Volume (m³)
<i>R13</i>	33,02	10,25	20,5	52,42	0,04424
<i>R14</i>	35,56	10,25	20,5	55,06	0,04881
<i>R15</i>	38,10	10,25	20,5	57,60	0,05342
<i>R16</i>	40,64	10,25	20,5	60,14	0,05823

As paredes exteriores que delimitam a zona verde da habitação, possuem uma constituição ligeiramente diferente, uma vez que não constituem fachadas enterradas. Assim, estas são apenas constituídas por pneus cheios de terra, de dimensões semelhantes às consideradas para as fachadas enterradas do edifício, nas quais se incluem os pneus de fundação e os de

prolongamento da parede, que constituem apenas uma fiada acima do piso térreo, uma vez que altura considerada para este murete, que suportará os grandes envidraçados, é de aproximadamente 20 cm.

Esta parede é isolada com placas de XPS pelo exterior, sendo colocada posteriormente a argamassa de reboco, quer na superfície interior, quer na exterior, para finalização com pintura. É importante não descuidar o reforço nos isolamentos para a colocação da caixilharia das janelas, porém este aspeto não será abordado ao longo desta dissertação.

3.1.2. Paredes interiores

As paredes interiores consideradas como integrantes das soluções construtivas deste caso de estudo serão as referidas no capítulo anterior, que integram latas e garrafas de vidro. Tendo em conta os materiais aplicados, as paredes de latas terão uma espessura de aproximadamente 15 cm e as de garrafas de vidro de aproximadamente 20 cm.

A representação esquemática das soluções construtivas para paredes interiores onde é possível enumerar os materiais utilizados e as suas disposições, encontram-se nos Anexos III e IV, para a parede de latas e de garrafas de vidro, respetivamente.

3.1.3. Cobertura

A cobertura considerada é a cobertura *Earthship* padrão descrita no capítulo anterior. Esta é revestida com chapa de zinco lacada nervurada de cor verde, que é colocada sobre uma membrana betuminosa, que impede que a humidade exterior penetre o edifício através da cobertura, à qual se sucede o isolamento térmico constituído por placas de XPS de 6 cm de espessura. O revestimento interior é efetuado pela fixação de painéis OSB.

A representação esquemática desta solução construtiva é apresentada no Anexo V.

3.1.4. Pavimentos

a) Pavimento cerâmico

O pavimento cerâmico deste sistema construtivo é construído sobre o piso térreo com a colocação de uma tela impermeabilizante, que se prolonga a uma altura de 40 centímetros ao

longo da base da parede, sobre o solo, devidamente nivelado e compactado e com a devida construção da camada drenante. Sobre ela é colocada uma rede eletrosoldada para que seja colocada betonilha por cima até perfazer uma espessura de cerca de 20 cm. Em seguida é colocada a argamassa de colagem para assentamento dos ladrilhos cerâmicos.

A representação esquemática desta solução construtiva é apresentada no Anexo VI.

b) Pavimento em madeira

O pavimento revestido a madeira deste sistema construtivo é construído sobre o piso térreo com a colocação de uma tela impermeabilizante sobre o solo devidamente nivelado e compactado, que se prolonga a uma altura de 40 cm ao longo da base da parede, e sobre a qual é colocada uma rede eletrosoldada para que seja colocada betonilha por cima até perfazer uma espessura de cerca de 20 cm. Sobre a betonilha são colocadas placas de aglomerado de cortiça e ripas de madeira para satisfazerem as perfeitas condições de colocação das placas de madeira que constituem o revestimento da solução construtiva. Esta solução encontra-se esquematizada no Anexo VII.

c) Pavimento das células botânicas

As células botânicas do edifício, correspondente às parcelas cultivadas da zona verde para produção de bens alimentares próprios, devem, à semelhança das soluções construtivas de pavimentos anteriormente descritas, ser impermeabilizadas, para impedir a migração da humidade para o interior do edifício, uma vez que são parte integrante do mesmo. Como tal, é cavada uma vala nessa parcela de terreno onde é colocada uma tela impermeabilizante que se prolonga pela altura da vala e parede confinante até uma altura de cerca de 70 centímetros, sendo depois a vala preenchida com terra vegetal para cultivo. A sua esquematização é apresentada no Anexo VIII.

3.1.5. Sistema estrutural da versão Earthship

O sistema estrutural considerado para o edifício *Earthship* é constituído por vigas de madeira e paredes exteriores estruturais, definidas anteriormente.

Serão utilizadas oito vigas de madeira de secção circular, previamente tratada, seis delas de comprimento igual a 8 m e outras duas menores, todas com aproximadamente 40 cm de diâmetro.

Para assegurar a segurança estrutural das paredes de pneus serão introduzidos varões de aço, neste caso de 12 mm de diâmetro, no interior dos pneus tal como descrito no capítulo anterior.

3.2. Soluções construtivas da versão Convencional

3.2.1. Paredes exteriores

A parede exterior convencional selecionada é constituída por um único pano de alvenaria de tijolo furado com 22 cm de espessura, isolado pelo exterior com placas de poliestireno expandido (EPS) de 6 cm de espessura. O revestimento exterior é realizado com argamassa de reboco tradicional e o interior com gesso projetado para conferir um acabamento mais liso e regular da superfície interior do edifício para posterior pintura.

3.2.2. Paredes interiores

A parede interior convencional adotada é constituída por um único pano de alvenaria em tijolo cerâmico furado com 11 cm de espessura revestido numa das faces com gesso projetado. Na outra face, é isolado com manta de lã de rocha com 6 cm de espessura confinada entre o pano de alvenaria e um revestimento de placas de gesso cartonado fixado através de perfis metálicos para o efeito.

3.2.3. Cobertura

A cobertura convencional adotada é revestida com telha cerâmica, tipicamente utilizada em Portugal, e isolada termicamente com placas de XPS de 6 cm de espessura, sobre as quais se estende uma membrana betuminosa imediatamente abaixo das telhas para impedir a passagem de humidade para o interior do edifício através da cobertura. O revestimento interior dos tetos é feito com placas de gesso cartonado que são posteriormente pintadas, acompanhado a inclinação da laje teto.

3.2.4. Pavimentos

As soluções construtivas para o pavimento do piso térreo do edifício convencional são as mesmas que foram definidas como soluções do sistema *Earthship* na secção 3.1.4.

3.2.5. Sistema estrutural da versão convencional

O sistema estrutural deste sistema construtivo é o tradicionalmente utilizado, composto por vigas e pilares de betão armado.

Assim, esta é constituída por sete vigas de 8 metros de comprimento, 2 menores, e outras 2 em comprimento, todas elas de secção retangular de dimensões ilustradas na Figura 3.3. a), e 25 pilares de secção quadrada e dimensões ilustradas na Figura 3.3. b).

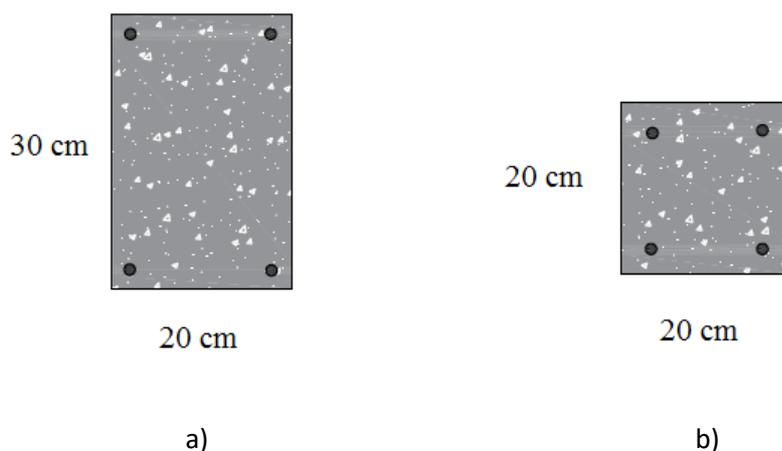


Figura 3.3: Secção da viga de betão armado- a); secção do pilar de betão armado- b)

Esta foi uma estrutura admitida com base nas dimensões da planta original do edifício, que não inclui este tipo de estrutura, mas sim a do conceito *Earthship*, com vista apenas à quantificação de materiais aproximada necessária ao cálculo dos impactes de ciclo de vida que serão abordados no Capítulo 5.

Através do procedimento de pré-dimensionamento estrutural, verifica-se que as dimensões adotadas para a viga suportam as cargas aplicadas à viga correspondentes apenas ao peso próprio da cobertura, uma vez que se despreza o peso próprio da viga. Esta verificação é efetuada pela expressão 3.1.

$$\mu = \frac{M_{Ed}}{b \times d^2 \times f_{cd}} < 0,25 \quad (3.1)$$

Em que:

- M_{Ed} - Momento aplicado na viga, [KN.m];
- b - Base da secção da viga, [m];
- d - Altura útil, considerando um recobrimento (a) de 0,05 m, obtida por $d = h - a$ [m];
- f_{cd} - Valor de cálculo da tensão de rotura à compressão, obtido por $\frac{f_{ck}}{\gamma_c}$ em que $\gamma_c = 1,5$ e $f_{ck} = 25 \text{ MPa}$;
- μ - Momento reduzido.

Tendo em conta as dimensões da cobertura e sabendo que esta é constituída por telhas cerâmicas, membrana betuminosa, XPS e gesso cartonado, de acordo com os respetivos valores presentes no anexo X, é possível quantificar o peso próprio da cobertura através dos dados da Tabela 3.2.

Tabela 3.2: Pesos dos constituintes da cobertura convencional

Material	Peso (KN/m ²)
<i>Telhas cerâmicas</i>	0,108
<i>XPS</i>	0,019
<i>Membrana betuminosa</i>	0,031
<i>Gesso cartonado</i>	0,129
Gk = 0,287 KN/m²	

Uma vez obtido o valor total de cargas permanentes (G_k) correspondente ao peso total da cobertura, é possível calcular o momento através da expressão 3.2.

$$M_{Ed} = \frac{P_{Ed} \times l^2}{8} \tag{3.2}$$

Em que:

- $P_{Ed} = 1,35 \times G_k$
- l - Comprimento da viga maior (mais desfavorável) que no caso é 8 m, [m];

Assim, é obtido um momento de aproximadamente 3,095 KN.m. Aplicando este valor à equação de verificação 3.1, verifica-se que, admitindo um betão da classe C25/30, a secção admitida é suficiente através do cálculo presente na expressão 3.3.

$$\mu = \frac{3,095}{0,20 \times 0,25^2 \times \frac{25}{1,5} \times 10^3} < 0,25 \Leftrightarrow 0,014856 < 0,25 \rightarrow OK! \quad (3.3)$$

Assim, por uma questão de uniformização da geometria da estrutura, os pilares possuem também a secção inicialmente definida, cujo comprimento do lado é igual ao da base da viga (Oliveira Gonçalves de Almeida Machado et al. 2010).

Como tal, sabendo que a área mínima de armadura de uma estrutura de betão armado corresponde a 10% da área da sua secção de betão, é admitida uma quantidade de aço na estrutura correspondente a 10% do volume de betão considerado, admitindo com base nos cálculos que as vigas teriam 4 varões de 16 mm de diâmetro em cada e os pilares 4 varões de 12 mm (Azenha et al. 2015).

4. METODOLOGIA

4.1. Análise do comportamento termo-energético

O comportamento térmico dos edifícios é avaliado com base em diversos parâmetros, nomeadamente o coeficiente de transmissão térmica (U), a condutibilidade térmica dos materiais (λ), as resistências térmicas superficiais e, naturalmente, depende das características de cada edifício. Esta avaliação permite saber se a sua construção e soluções adotadas proporcionam o devido conforto dos ocupantes, dentro das limitações impostas pelo REH, avaliando assim a quantidade de energia necessária para assegurar esse mesmo conforto. Através deste regulamento é possível também determinar a classe energética dos edifícios, algo que será também realizado para estabelecer um estudo comparativo ao longo deste mesmo capítulo.

Os edifícios considerados segundo os dois sistemas construtivos em estudo, serão avaliados em duas localizações distintas em Portugal, consideradas extremas em termos climáticos no país, sendo estabelecida uma comparação entre os respetivos comportamentos térmicos de cada sistema para estas mesmas localizações. Como tal, os edifícios serão implementados nos distritos de Vila Real e Beja, em zonas rurais muito expostas, ou seja, sem obstáculos consideráveis que atenuem o vento. Isto permitirá comparar o comportamento térmico de um mesmo sistema em duas localizações distintas e simultaneamente comparar ambos os sistemas considerando a mesma localização.

4.1.1. Coeficiente de transmissão térmica

O valor do coeficiente de transmissão térmica (U) de um elemento caracteriza a transferência de calor que ocorre entre os espaços ou meios que este separa e, para efeitos da aplicação do Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Habitação (REH) o seu cálculo deve ser executado segundo o Despacho 15793-K/2013 do mesmo (REH- Portugal 2013). Assim, este pode ser calculado através da expressão 4.1.

$$U = \frac{1}{R_{si} + \sum R_j + R_{se}} \quad [W/(m^2 \cdot ^\circ C)] \quad (4.1)$$

Em que:

- R_{si} - Resistência térmica superficial interior, [$m^2 \cdot ^\circ C/W$];
- R_j - Resistência térmica da camada j da solução construtiva, [$m^2 \cdot ^\circ C/W$];
- R_{se} - Resistência térmica superficial exterior, [$m^2 \cdot ^\circ C/W$].

Esta é a equação geral, no entanto, no caso de o elemento separar um espaço útil de um espaço não útil são utilizadas duas resistências térmicas superficiais interiores, sendo uma delas referente à superfície interior ao espaço útil e a outra à superfície interior do elemento pertencente ao espaço não útil (REH- Portugal 2013).

Os valores das resistências superficiais são retirados do REH, e variam com o sentido do fluxo de calor através do elemento construtivo. Estes valores são quantificáveis através da Tabela 4.1 baseada nos valores referidos no REH.

Tabela 4.1: Valores de resistência térmica superficial (REH- Portugal 2013)

Sentido do fluxo de calor		Resistência térmica [$m^2 \cdot ^\circ C/W$]	
		<i>Exterior R_{se}</i>	<i>Interior R_{si}</i>
<i>Horizontal</i>		0,04	0,13
<i>Vertical</i>	<i>Ascendente</i>	0,04	0,10
	<i>Descendente</i>	0,04	0,17

Uma vez que a habitação *Earthship*, ao contrário da convencional, possui fachadas enterradas e sendo que em ambos o pavimento se encontra assente diretamente sobre o piso térreo, existe a necessidade utilizar o procedimento de cálculo mencionado no REH para a obtenção do coeficiente de transmissão térmica de elementos construtivos em contacto com o terreno.

Segundo o regulamento, no cálculo do coeficiente de transmissão térmica deste tipo de elementos são excluídas as resistências térmicas superficiais, quer interiores quer exteriores, sendo apenas contabilizado o somatório das resistências térmicas de cada camada de material constituinte da solução construtiva do elemento em questão. Neste caso, este somatório das

resistências térmicas dos materiais é denominado R_f no caso dos pavimentos e R_w no caso das paredes. Consoante os valores correspondentes aos parâmetros anteriormente mencionados, é possível obter os valores dos coeficientes de transmissão térmica destes elementos a partir das tabelas presentes no regulamento.

A Tabela 06 do Despacho 15793-K/2013 do REH (REH- Portugal 2013) corresponde ao caso das paredes em contacto com o solo e, para o cálculo do seu coeficiente de transmissão térmica (U_{bw}) é considerado o pé-direito do edifício, igual a 2,70 metros, que corresponde ao valor de Z .

Para o cálculo do coeficiente de transmissão térmica de pavimentos em contacto com o solo (U_{bf}), é necessário, para além do valor de R_f , o cálculo da dimensão característica do pavimento (B'), parâmetro esse obtido através da expressão 4.2 (REH- Portugal 2013).

$$B' = \frac{A_p}{0,5 \times P} \quad [\text{m}] \quad (4.2)$$

Em que:

- A_p – Área útil de pavimento medida pelo interior, [m^2];
- P – Perímetro exposto, que corresponde ao desenvolvimento total de parede que separa o espaço aquecido do exterior, de um edifício adjacente ou de um espaço não climatizado, ou do solo, pelo interior, [m].

Nos casos de estudo, considera-se que a altura do isolamento do pavimento que se prolonga em altura pela parede da envolvente exterior (Z), não ultrapassa os 0,5 metros.

Obtidos os parâmetros mencionados, é possível obter o valor de U_{bf} através da Tabela 03 do Despacho 15793-K/2013 do REH.

Nos casos em que o somatório das resistências térmicas das camadas constituintes do pavimento seja inferior a $0,5 \text{ m}^2 \cdot \text{°C}/\text{W}$ e o valor da altura do isolamento (Z) for menor ou igual a 0,5 metros, o valor do coeficiente de transmissão térmica é de $1,15 \times U_{R_f=0,5}$, sendo $U_{R_f=0,5}$ o valor retirado da Tabela 03.

Os valores obtidos deverão ser menores que os valores do coeficiente de transmissão térmica máximos ($U_{máx}$) admissíveis que, segundo o regulamento em vigor a partir de 31 de Dezembro de 2015, deverão ser iguais ou inferiores aos dos coeficientes de transmissão térmica de referência (U_{ref}) regulamentar, cujos valores se encontram apresentados na tabela do REH representada na Tabela 4.2 agrupados mediante as zonas climáticas de inverno em Portugal (REH- Portugal 2013).

Tabela 4.2: Valores do U_{ref} consoante zona climática do país que constam da regulamentação em vigor (REH- Portugal 2013)

U_{ref} [W/(m ² .°C)]		Zona Climática		
Portugal continental				
Zona corrente da envolvente		31 de dezembro de 2015		
		<i>I1</i>	<i>I2</i>	<i>I3</i>
<i>Em contacto com o exterior ou com espaços não úteis com coeficiente de redução de perdas, $b_{tr} > 0,7$</i>	<i>Elementos opacos verticais</i>	0,40	0,35	0,30
	<i>Elementos opacos horizontais</i>	0,35	0,30	0,25
<i>Em contacto com outros edifícios ou espaços não úteis com coeficiente de redução de perdas, $b_{tr} \leq 0,7$</i>	<i>Elementos opacos verticais</i>	0,80	0,70	0,60
	<i>Elementos opacos horizontais</i>	0,70	0,60	0,50
<i>Vãos envidraçados (portas e janelas) (U_w)</i>		2,80	2,40	2,20
<i>Elementos em contacto com o solo</i>		0,50		

A seleção destes valores limite para o coeficiente de transmissão térmica dependem ainda de um outro parâmetro denominado coeficiente de redução de perdas (b_{tr}). Este traduz a redução da transmissão de calor, afetando o cálculo das perdas de calor por transmissão através de elementos que separam os espaços delimitados pelos elementos da envolvente interior e é determinado com base na Tabela 22 do Despacho D15793K (REH- Portugal 2013).

No entanto, contemplando a planta dos edifícios em estudo é possível verificar que apenas existem apenas dois tipos de elementos classificados de acordo com o seu tipo de envolvente - elementos da envolvente exterior e elementos em contacto com o solo. Como tal, apenas existirá uma classificação dos elementos da envolvente exterior segundo um coeficiente de redução de perdas de valor superior a 0,7.

4.1.2. Certificação energética dos edifícios

A certificação e pré-certificação energética dos edifícios é efetuada com base na folha de cálculo de aplicação do REH disponibilizada pelo ITeCons (ITeCons & Universidade de Coimbra 2017). Esta folha está preparada para, mediante o seu preenchimento, fazer automaticamente a verificação de requisitos mínimos e energéticos de edifícios, assim como realizar uma análise técnico-económica de medidas de melhoria. Porém, esta última não será efetuada nesta dissertação, uma vez que o objetivo é apenas certificar o edifício de cada conceito e verificar se as suas necessidades energéticas são satisfeitas tendo por base as soluções construtivas e sistemas técnicos adotados e que caracterizam cada um deles, estabelecendo assim uma análise comparativa.

No entanto, para além das soluções construtivas já definidas e dos respetivos coeficientes de transmissão térmica é necessário reunir um vasto conjunto de parâmetros para o preenchimento desta folha de cálculo. De entre estes parâmetros destacam-se a inércia térmica, cuja metodologia de cálculo é descrita no subcapítulo seguinte, caracterização dos sistemas técnicos, caracterização dos envidraçados, definição e caracterização do sistema de ventilação para assegurar a qualidade do ar interior, entre outros.

a) Inércia térmica

A inércia térmica de um edifício traduz-se pela massa superficial útil por metro quadrado de pavimento (I_t) e é calculada através da expressão 4.3.

$$I_t = \frac{\sum_i M_{si} \times r \times S_i}{A_p} \quad [kg/m^2] \quad (4.3)$$

Em que:

- M_{si} - Massa superficial útil do elemento i , $[kg/m^2]$;
- r - Fator de redução da massa superficial útil;
- S_i - Área de superfície interior do elemento i , $[m^2]$;
- A_p - Área útil de pavimento, $[m^2]$.

Pode ser classificada como forte, média ou fraca consoante o intervalo de valores a que pertencer a inércia térmica calculada através da fórmula mencionada. Assim, deverá ser classificada de acordo com os intervalos de valores apresentados na Tabela 4.3 (REH- Portugal 2013).

Tabela 4.3: Classificação da inércia térmica

Classe de inércia térmica	I_t (kg/m ²)
<i>Fraca</i>	$I_t < 150$
<i>Média</i>	$150 \leq I_t \leq 400$
<i>Forte</i>	$I_t > 400$

b) Vãos envidraçados e vãos opacos exteriores

Tal como mencionado no Capítulo 3 na descrição da planta do edifício em estudo, os envidraçados exteriores considerados para ambos os conceitos são simples, de vidro duplo com caixilharia de madeira sem classificação, e colocados à face exterior da parede.

É considerado como dispositivo de oclusão noturna o estore veneziano na caixa-de-ar, sendo esta considerada uma proteção pelo interior e, portanto, dispensada a existência de caixa de estore.

Considerou-se uma fração envidraçada (F_g) de 0,65 e um fator solar do vidro ($g_{\perp vi}$) de 0,75.

Como vãos opacos exteriores é considerada apenas uma porta exterior de largura 0,90 m e altura de 2,10 m de madeira maciça, com um coeficiente térmico de 2,31 W/m².°C que permite a entrada na habitação através da zona verde.

c) Ventilação

A aplicação LNEC para ventilação do âmbito do REH e do RECS tem como objetivo a verificação do requisito mínimo da taxa de renovação do ar no interior dos edifícios (R_{ph}) que corresponde a 0,4 renovações por hora ($R_{ph}=0,4 \text{ h}^{-1}$), resultando numa consequente melhoria da qualidade do ar interior o que evita a formação de patologias indesejadas nos edifícios e na diminuição de ameaças à saúde pública.

Como tal, segundo o regulamento em vigor, deve ser assegurado que os caudais mínimos são de 0,6 renovações por hora na estação de arrefecimento ($R_{ph,v} = 0,6 \text{ h}^{-1}$) segundo o Despacho 15793-K/2013 do REH e de 0,4 renovações por hora na estação de aquecimento ($R_{ph,i} = 0,4 \text{ h}^{-1}$) de acordo com a Portaria 349B/2013 do REH. Considerando ainda um valor para um edifício de referência de $R_{ph,i \text{ REF}} = 0,6 \text{ h}^{-1}$ (REH- Portugal 2013).

Assim, tal como referido anteriormente, considerando as localizações e as características do edifício, define-se uma altitude de 100 m para a localização selecionada para os edifícios em Beja e 500 m para a localização selecionada em Vila Real. Considera-se que não existem obstáculos à frente das fachadas, o que se traduz num ângulo de obstrução no horizonte de 20° .

Para os vãos envidraçados, considerou-se que a classe de permeabilidade ao ar das caixilharias das janelas é desconhecida, como tal considera-se sem classificação. O mesmo é considerado para a porta de entrada, para a qual não foi definida qualquer classe de permeabilidade ao ar específica. As janelas são, na sua maioria, fixas, por isso, é necessária a introdução de métodos de ventilação alternativos, quer por aberturas de admissão de ar ou equipamentos mecânicos.

Assim, para assegurar a renovação do ar de ambos os edifícios, a ventilação é efetuada sem recurso a meios de extração e admissão de ar mecânicos ou híbridos, mas sim com recurso a condutas de ventilação natural de extração e admissão. O sistema de ventilação é constituído por sete condutas de admissão de ar tubulares com 250 mm de diâmetro colocadas na fachada enterrada a norte, admitindo assim a entrada de ar proveniente do norte geográfico que é mais fresco, assegurando também o arrefecimento dos edifícios. Estas comportas podem ser abertas ou fechadas, mediante a necessidade através de portadas de madeira.

Na cobertura, inclinada entre 10° a 30° , são colocadas sete comportas de exaustão do ar, que podem também ser abertas ou fechadas e que permitem a circulação do ar por ventilação efeito chaminé no interior do edifício.

Tendo por base os dados anteriormente descritos, é possível estimar o caudal mínimo de ventilação através do balanço de energia do edifício em cada uma das duas localizações através

da folha de cálculo da aplicação LNEC. Os resultados deste balanço são apresentados no Capítulo 5.

d) Sistemas técnicos

d.1) Sistemas técnicos do edifício *Earthship*

O edifício *Earthship*, baseando-se no seu conceito base de autossuficiência e sustentabilidade, renuncia à utilização de equipamentos que possuam combustíveis fósseis como fonte de energia. Como tal, este edifício não possuirá ligação a uma rede de abastecimento de gás natural. A principal fonte de energia utilizada é o sol, como tal, serão utilizados equipamentos que tirem o máximo proveito desta fonte.

No conceito real, teoricamente existem apenas necessidades energéticas para o aquecimento de águas quentes sanitárias, sendo o arrefecimento e aquecimento assegurados pelo design passivo do edifício. No entanto, no contexto de simulação da folha de cálculo, existem necessidades energéticas para aquecimento de AQS, aquecimento e arrefecimento.

Assim, existem dois principais sistemas no edifício: um sistema solar térmico para aquecimento de água e um sistema solar fotovoltaico cuja utilização é repartida para aquecimento e arrefecimento de igual forma, sendo também a fonte de energia elétrica da habitação.

É necessário selecionar equipamentos que assegurem o máximo percentual das necessidades do edifício de acordo com o seu número de habitantes e não simplesmente selecionar um coletor solar padrão ou painel fotovoltaico padrão. Contudo, no caso dos painéis fotovoltaicos, a energia produzida durante o dia só é utilizável ao longo das horas do sol, ou seja, apenas é possível utilizar o valor de produção de autoconsumo, caso não existam dispositivos de armazenamento da energia produzida, neste caso, baterias.

Assim, através da folha de cálculo para Quantificação do contributo de sistemas para aproveitamento de Fontes de Energia Renováveis da Direção-Geral de Energia e Geologia, para Vila Real, considera-se que é utilizado um painel fotovoltaico Shüco MPE 90 AL 01 de 10 módulos fotovoltaicos e 14,3 m² de área e inclinado 35°, que

produz 1429 kWh/ano, dos quais apenas 349 kWh/ano são de autoconsumo. No entanto, considera-se que a utilização de baterias permite armazenar 60% da energia produzida para que esta seja consumida à noite. Assim, considera-se que o painel fotovoltaico fornece 857,4 kWh/ano de energia ao edifício. Este valor é repartido para aquecimento e arrefecimento, no entanto, numa situação real ela é utilizada para fornecer energia elétrica ao edifício, que mediante a necessidade dos habitantes, pode ser utilizada para fornecer energia também a equipamentos elétricos de climatização de uso pontual.

Para Beja, utilizando a mesma folha de cálculo e selecionando o mesmo painel fotovoltaico, obtém-se uma produção total de 1626 kWh/ano, o que asseguraria a satisfação de 95% das necessidades do edifício, no entanto, apenas 377 kWh/ano são de autoconsumo. Assim, acumulando 60% da energia nas baterias, o painel fornece à habitação 975,6 kWh/ano.

Para assegurar o aquecimento de águas quentes sanitárias, é utilizado um sistema solar térmico, constituído por dois coletores solares térmicos Vulcano FKT-2S com área total de 4,85 m², cujo painel possui 35° de inclinação, e com um depósito Vulcano TSS 300 com capacidade para 300l. Este sistema permite assegurar 85% das necessidades de aquecimento de AQS do edifício situado em Vila Real através da produção de 2011 kWh para o efeito.

Através da mesma folha de cálculo, efetuou-se a mesma simulação com o mesmo sistema de coletores de 4,85 m² para Beja, obtendo-se uma produção de 2191 kWh que assegura a satisfação de 92% das necessidades.

Uma vez que a totalidade das necessidades não é assegurada, é necessário implementar sistemas de apoio na habitação. Estes sistemas são, para aquecimento e arrefecimento, os definidos no REH como sistemas por defeito. São eles os radiadores ou acumuladores fixos a eletricidade com eficiência de 1,00 e potência de 2 kW para aquecimento e unidades split (ar- ar) para arrefecimento com eficiência de 3,00 e potência 5 kW. Uma vez que a construção *Earthship* é construída em zonas remotas sem acesso à rede elétrica pública, esta eletricidade quando não é assegurada pelos painéis fotovoltaicos, uma vez que estes não cobrem 100% das necessidades, é assegurada por geradores a

gasolina que são utilizados apenas para as situações em que a energia solar não é suficiente, contudo a sua existência não é contabilizada no REH, uma vez que este constitui uma fonte de eletricidade e não um sistema técnico para aquecimento de AQS ou climatização.

Para aquecimento de AQS o sistema de apoio é um esquentador a gás butano em botija. Assim, o edifício deve dispor de uma botija de reserva para os casos em que o coletor solar térmico não assegure a satisfação das necessidades. Este sistema de apoio possui uma eficiência de 0,89 e uma potência de 9 kW.

Foi considerado o esquentador a gás, uma vez que, sendo que este apenas será utilizado quando a eletricidade produzida pelo painel fotovoltaico não for suficiente, este receberá a energia necessária ao seu funcionamento a partir dum gerador e aquecerá a água através do gás butano.

A adoção de um termoacumulador elétrico como sistema de apoio para produção de AQS neste edifício poderia também ser considerada, contudo implicaria uma maior produção de eletricidade por parte do gerador relativamente a um esquentador, o que não seria desejável.

d.2) Sistemas técnicos do edifício Convencional

Uma vez que a instalação de um sistema solar nos novos edifícios é obrigatória segundo a legislação em vigor, foi implementado no edifício um sistema solar térmico padrão do REH de 2,60 m² de área, constituído por quatro coletores padrão e um depósito com capacidade de 160 l.

O resultado obtido pela simulação na folha de cálculo da DGEG para o sistema solar térmico padrão em Beja indica que este assegura o cumprimento de 70% das necessidades de aquecimento de águas quentes sanitárias através da produção de 1657 kWh.

Para a instalação do mesmo sistema solar térmico em Vila Real, o resultado da simulação indica que 61% das necessidades de aquecimento de águas quentes sanitárias

são satisfeitas via solar através da produção de 1449 kWh de energia por parte dos coletores.

Como sistema de apoio ao aquecimento de águas quentes sanitárias, uma vez que não é assegurado o cumprimento de 100% das necessidades por parte do sistema de coletores, é considerado o sistema por defeito definido pelo REH, que é um termoacumulador elétrico com 0,95 de eficiência.

Para a satisfação das necessidades de climatização do edifício convencional, são admitidos os sistemas por defeito definidos pelo REH para aquecimento e arrefecimento. Assim, são considerados radiadores ou acumuladores fixos elétricos de 1,00 de eficiência para aquecimento e unidades de ar-condicionado split (ar- ar) elétricos com eficiência de 3,00 para arrefecimento.

e) Indicadores energéticos

O balanço energético do edifício segundo a folha de cálculo do REH é efetuado de acordo com os resultados de sete indicadores energéticos: as necessidades nominais anuais de energia útil para aquecimento (N_{ic}) em kWh/m². ano; as necessidades nominais anuais de energia útil para arrefecimento (N_{vc}) em kWh/m². ano; a energia útil para preparação de água quente sanitária (Q_a) em kWh/ano; energia elétrica necessária ao funcionamento dos ventiladores (W_{vm}) em kWh/ano, que é igual a zero para todos os casos em estudo uma vez que não existe ventilação mecânica; a energia produzida a partir de fontes renováveis (E_{ren}) em kWh/ano; a energia exportada proveniente de fontes renováveis ($E_{ren,ext}$) em kWh/ano, que nos casos em estudo é também igual a zero uma vez que no caso do edifício *Earthship* não existe ligação à rede pública para realizar essa exportação e, em ambos os casos, não existem sistemas com produção suficiente para que esta se realize; as necessidades nominais anuais globais de energia primária (N_{tc}) em kWh/m². ano.

Para que se verifique a satisfação das necessidades energéticas os valores de N_{ic} , N_{vc} e N_{tc} deverão ser iguais ou inferiores aos seus respetivos valores de referência N_i , N_v e N_t , respetivamente.

f) Determinação da classe energética

A classe energética dos edifícios é calculada segundo o Despacho 15793-J/2013 através do enquadramento do rácio de classe energética (R_{Nt}) obtido pela aplicação da expressão 4.4 (REH-Portugal 2013).

$$R_{Nt} = \frac{N_{tc}}{N_t} \quad (4.4)$$

Em que:

- N_{tc} – Valor das necessidades nominais anuais globais de energia primária, [kWh_{ep}/m².ano];
- N_t – Valor limite regulamentar para as necessidades nominais anuais de energia primária, [kWh_{ep}/m².ano].

A classe é obtida pelo enquadramento de R_{Nt} nos intervalos de valores apresentados na Tabela 4.4.

Tabela 4.4: Intervalos de valores para obtenção da classe energética (REH- Portugal 2013)

Classe Energética	Valor 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	$R_{Nt} \geq 2,51$

4.3. Análise do impacte de ciclo de vida

Os constantes problemas ambientais associados ao sector da construção requerem a utilização de ferramentas que ajudem ao estudo e controlo do consumo de recursos e na redução do impacte ambiental. Assim, a Análise Ciclo de Vida (LCA) é uma metodologia utilizada para quantificar os impactes ambientais de um produto ou serviço, incluindo os de um edifício, assim como os impactes económicos e funcionais a ele associados ao longo do seu ciclo de vida (Soust-Verdaguer et al. 2017). No presente caso, o ciclo de vida terá uma duração de 50 anos, que corresponde à vida útil do edifício definida em projeto, uma vez que este é o período referido nos Eurocódigos atuais como sendo o tempo de vida útil expectável para edifícios de habitação (Appleton 2017).

Assim, ao longo deste capítulo será explicitada a metodologia de cálculo de cada um dos impactes mencionados, recorrendo ao software *SimaPro*[®] para a obtenção dos impactes ambientais a partir das quantidades totais de material utilizadas para cada edifício e ao Gerador de Preços para a construção com previsão de custos do *CYPE*[®] para a avaliação dos custos de ciclo de vida.

A sustentabilidade do edifício *Earthship* será avaliada, tendo em conta cada solução construtiva que o integra, sendo efetuada uma análise comparativa face ao sistema convencional. Assim, será avaliada a sustentabilidade dos edifícios *Earthship* e Convencional para um mesmo local, neste caso em Vila Real, numa zona afastada do centro urbano, através da Metodologia de Avaliação Relativa da Sustentabilidade de Soluções Construtivas (MARS-SC). Nesta metodologia são consideradas as três dimensões: ambiental, funcional e económica (Mateus & Bragança 2006).

Existem para cada dimensão inúmeros parâmetros que podem ser avaliados segundo a metodologia MARS-SC, são exemplos destes parâmetros os enumerados na Tabela 4.5.

Tabela 4.5: Potenciais parâmetros em avaliação pela metodologia MARS-SC (Mateus & Bragança 2006)

Parâmetros		
<i>Funcionais</i>	<i>Ambientais</i>	<i>Económicos</i>
Isolamento térmico; Isolamento sonoro a sons de percussão; Isolamento sonoro a sons de condução aérea; Durabilidade; Comportamento ao fogo; Impermeabilidade; Construtibilidade; Comportamento sísmico; Estabilidade; Flexibilidade; Inovação e desenho.	Potencial de aquecimento global (PAG); Energia primária incorporada (PEC); Conteúdo reciclado; Potencial de reciclagem; Potencial de reutilização; Quantidade de matéria/ recursos naturais utilizados; Toxicidade; Acidificação; Eutrofização das reservas de água; Quantidade de água incorporada.	Custo de construção; Custo de manutenção; Custo de reabilitação; Custo de desmantelamento/demolição; Valor residual; Custo do tratamento para devolução ao meio natural.

Contudo, tendo em conta os parâmetros analisados ao longo dos capítulos anteriores desta dissertação, constata-se que o parâmetro mais adequado à avaliação do desempenho funcional dos edifícios é o isolamento térmico dos elementos da envolvente exterior, centralizando-se esta análise comparativa apenas nos valores obtidos para o coeficiente de transmissão térmica das soluções construtivas de cada um através da metodologia de cálculo apresentada em 4.1.1.

No que diz respeito à análise do desempenho económico, uma vez que ao longo de uma vida útil de 50 anos de um edifício *Earthship* não são conhecidos dados acerca das necessidades de manutenção e reabilitação, são considerados apenas os custos de construção para análise comparativa entre os dois conceitos para que esta seja executada com uniformidade de parâmetros.

Relativamente ao desempenho ambiental, este será determinado para ambos os edifícios através da análise da obtenção dos indicadores, através de dois métodos distintos, e os seus respetivos

pesos, referidos na Tabela 4.6, sendo a metodologia de cálculo para a sua determinação apresentada na secção 4.2.2.

Tabela 4.6: Indicadores ambientais considerados para o cálculo do impacte ambiental (Neiva et al. 2012; Ferreira et al. 2015)

Métodos LCA utilizados	Indicadores (I_A)	Denominação	Unidade	Peso % (W_{Ai})
CML Baseline 2000	<i>ADP</i>	Potencial de exploração do meio ambiente	kg Sb eq	-
	<i>AP</i>	Potencial de Acidificação do solo e da água	kg SO ₂ eq	11,90
	<i>EP</i>	Potencial de Eutrofização	kg PO ₄ eq	11,90
	<i>GWP</i>	Alterações Climáticas expressas em potencial de aquecimento global	kg CO ₂ eq	38,10
	<i>ODP</i>	Potencial de Destruição da camada de Ozono estratosférico	kg CFC-11 eq	11,90
	<i>POCP</i>	Potencial de formação de Ozono expresso em concentração de oxidantes fotoquímicos	kg C ₂ H ₄ eq	14,29
Cumulative Energy Demand	<i>ENR</i>	Energia não-renovável incorporada	MJ eq	11,90
	<i>ER</i>	Energia renovável incorporada	MJ eq	-

Para os mesmos indicadores e respetivos pesos serão efetuadas duas análises do desempenho ambiental para ambos os edifícios que se distinguem pela contabilização ou não dos seus sistemas técnicos.

4.3.1. Desempenho funcional

O desempenho funcional dos edifícios é determinado com base no coeficiente de transmissão térmica das soluções construtivas que delimitam a envolvente exterior de cada um deles.

Uma vez que, das soluções que compõem a envolvente exterior, apenas as adotadas para os pavimentos são semelhantes para ambos os conceitos, para o cálculo do desempenho funcional de cada um dos edifícios serão consideradas as que são distintas e podem ser objeto de comparação. Assim, serão contabilizadas as coberturas e paredes exteriores de cada edifício para a determinação do valor que caracteriza o desempenho funcional.

Considerando que nos edifícios convencionais, por aproximação, 25% das perdas de calor ocorrem através da cobertura e 35% através das paredes exteriores do edifício, isto corresponde a 60% da área total de perdas. Excluindo os pavimentos desta análise, que correspondem aos 40% restantes, a análise deverá ser feita considerando que a soma das perdas através das paredes exteriores e cobertura correspondem à total área de possíveis transferências de calor com o meio.

Como tal, para a determinação de um coeficiente de transmissão térmica global para cada edifício, será efetuada considerando que 41,6667% das perdas de calor ocorrem através da cobertura e 58,3333% através das paredes exteriores. Estes valores correspondem ao peso (W_i) de cada solução construtiva nas perdas de calor através da envolvente exterior.

Assim, o valor do coeficiente de transmissão térmica global (U_{global}) é determinado através da expressão 4.5.

$$U_{global} = \frac{\sum_{i=1}^n W_i \times U_i}{100} \quad (4.5)$$

Em que:

- W_i – Peso da solução construtiva i na envolvente exterior, [%];
- U_i – Coeficiente de transmissão térmica do elemento i , [$W/m^2 \cdot ^\circ C$].

Assim, efetuando a normalização de parâmetros, sabe-se que o valor que traduz o desempenho funcional (I_F) de uma solução construtiva corresponde ao valor do seu coeficiente de transmissão térmica global normalizado ($\overline{U_{global}}$), sendo a equação geral apresentada na expressão 4.6

$$I_F = \overline{U_{global}} \quad (4.6)$$

A normalização de parâmetros é efetuada através da aplicação da expressão 4.7.

$$\bar{P} = \frac{P_i - P_{i*}}{P_{*i} - P_{i*}} \forall i \quad (4.7)$$

Em que:

- P_i – Valor a normalizar;
- P_{i*} – Pior valor do parâmetro P_i nas soluções em estudo (maior valor);
- P_{*i} – Melhor valor do parâmetro P_i nas soluções em estudo (menor valor).

4.3.2. Desempenho ambiental

O impacto ambiental de cada solução construtiva que integra os edifícios é determinado com base na inserção do peso total de cada material como integrante do processo de montagem de cada solução no software *SimaPro*®. Nos Anexos XI e XII é possível consultar as tabelas com as quantidades totais de material de cada solução construtiva para os edifícios *Earthship* e Convencional, respetivamente.

São obtidos os valores para 8 indicadores ambientais, 6 categorias de impacto ambiental e 2 de energia, renovável e não-renovável incorporada. As suas denominações e respetivos pesos na determinação do desempenho ambiental dos edifícios neste estudo são apresentados na Tabela 4.6, encontrando-se agrupados pelo método LCA utilizado para a sua quantificação. Serão efetuadas duas análises globais ao edifício através de ambos os métodos em que são consideradas apenas 5 categorias de impacto ambiental, de entre as quais a ADP é excluída,

obtidas pelo *CML Baseline 2000* e 1 de energia obtido pelo *Cumulative Energy Demand* correspondente à energia incorporada não renovável (ENR). A soma dos respetivos pesos de cada categoria deve ser de 100%. As duas análises efetuadas distinguem-se pela presença ou ausência da contabilização dos sistemas técnicos.

Com vista a entender melhor o impacto dos sistemas técnicos no desempenho ambiental de cada um dos edifícios, é também realizada uma análise direcionada apenas ao Potencial de Aquecimento Global (GWP) dos edifícios equipados com os respetivos sistemas técnicos, de forma a estudar as poupanças energéticas associadas ao seu ciclo de vida, através da estimativa do tempo de retorno da adoção de sistemas *Earthship* relativamente aos convencionalmente adotados num edifício tradicional.

Obtidos os resultados de cada indicador para cada solução construtiva, efetua-se a soma dos resultados obtidos em cada indicador, de forma a obter o valor total relativo a todo o edifício para cada um dos oito em consideração.

Relativamente aos indicadores obtidos pelo *Cumulative Energy Demand*, os valores de ENR e ER são obtidos através da soma dos resultados das categorias de impacto de energia fóssil (*Non-renewable, fossil*) com energia nuclear (*Non-renewable, nuclear*) e biomassa (*Non-renewable, biomass*) e da soma de biomassa (*Renewable, biomass*) com energia eólica, solar e geotérmica (*Renewable, wind, solar, geothe*) e hídrica (*Renewable, water*), respetivamente.

Os valores obtidos para cada indicador em cada solução construtiva, para ambos os edifícios, são normalizados através da expressão 4.7 apresentada anteriormente.

Após essa normalização, e conhecendo o peso correspondente a cada indicador, é calculado o impacto ambiental (I_A) total do edifício através da expressão 4.8.

$$I_A = \frac{\sum_{i=1}^n W_{Ai} \times \overline{I_{Ai}}}{100} \quad (4.8)$$

Em que:

- W_{Ai} - Peso de cada indicador ambiental no impacto ambiental global do edifício, [%];

-
- $\overline{I_{Ai}}$ - Desempenho ambiental de um determinado indicador ambiental i normalizado.

a) *Cradle-to-Gate e Gate-to-Grave*

Antes da determinação do desempenho ambiental de todo o edifício, é necessária a contabilização de fatores fundamentais ao cálculo do impacto ambiental de cada solução, nomeadamente o transporte de materiais. Assim, quando definidas as quantidades de cada material, é definido paralelamente o trajeto do seu transporte entre o fornecedor e a obra (*Cradle-to-Gate*) e o seu percurso da obra ao destino de fim de vida (*Gate-to-Grave*), tendo como critério preferencial a proximidade geográfica, uma vez que esta acarreta menores emissões para a atmosfera, e a qualidade dos produtos. Assim, tendo em conta a localização do terreno de implantação de obra, nas coordenadas 41°14'13,9''N 7°42'54,9''W, cuja rua não possui denominação, uma vez que foi selecionado um local remoto relativamente à zona urbana para a fidedignidade da implementação do conceito *Earthship*, encontram-se apresentadas na Tabela 4.7 as distâncias determinadas entre os fornecedores selecionados e a localização definida para o edifício.

Tabela 4.7: Distâncias entre os fornecedores e o local da obra

Fornecedores	Distância	Morada	Tipo de material
<i>Preceram</i>	144	Aveiro	Tijolos e telhas cerâmicas
<i>Recauchutagem</i>	18,3	Vila Real	Pneus
<i>EMARVR</i>	13,7	Vila Real	Latas e garrafas de vidro
<i>Siper, Lda</i>	110	Maia	XPS e EPS
<i>Danosa</i>	240	Leiria	Membrana betuminosa
<i>Weber</i>	151	Aveiro	Argamassa de colagem
<i>Brivel- Britas e Betões de Vila Real SA</i>	17,9	Vila Real	Betão e argamassa
<i>Serração António Adalberto Moreira de Carvalho</i>	25,5	Vila Real	Madeira para vigas, ripas e revestimento
<i>CIN</i>	107	Maia	Tintas
<i>Cinca</i>	113	Santa Maria da Feira	Revestimentos cerâmicos
<i>SOFI</i>	99,1	Maia	Janelas e portas
<i>Amorim Revestimentos, SA</i>	116	Santa Maria da Feira	Cortiça
<i>SONAE SGPS, SA</i>	108	Maia	OSB
<i>J. Soares Correia</i>	6,4	Vila Real	Ferro (malhasol e varões de aço)
<i>Martins Ferreira</i>	112	Braga	Gesso projetado e cartonado
<i>Onduline</i>	113	Vila Nova de Gaia	Chapa lacada nervurada de zinco

É importante realçar que os materiais que são reutilizados não foram produzidos com o propósito de serem constituintes da obra, isto é, os materiais reaproveitados no fim de vida da sua função original, como as latas, garrafas e pneus, o seu processo de fabrico não é contabilizado para o impacte ambiental, sendo apenas considerado o seu transporte desde a entidade de recolha destes resíduos até à obra. No caso, esta entidade é a EMARVR.

O mesmo acontece com a terra que constitui as soluções construtivas, sendo apenas considerado o seu transporte e movimento com o auxílio de uma escavadora. O transporte de todos os materiais é assegurado por camiões convencionais (camião médio da frota existente na europa).

O mesmo critério de proximidade referido é utilizado para o fim de vida, no qual o destino final dos materiais após a demolição é o aterro, como tal, os resíduos gerados são encaminhados para a EMARVR que é a empresa encarregue da gestão de resíduos em Vila Real. Apenas a terra constituinte das soluções construtivas *Earthship* permanece no local da demolição, os restantes resíduos são encaminhados para aterro por um camião convencional. Existe a possibilidade de fazer uma seleção de resíduos, encaminhando-os posteriormente para reciclagem. No entanto, por uma questão de uniformização para posterior análise comparativa, considerou-se que o cenário de fim de vida seria o mesmo para as soluções de ambos os edifícios, dando ênfase à fase de construção e vida útil de ambos, no entanto existem diferenças reais entre os casos de estudo que deveriam ser contabilizadas. Também as empresas de reciclagem dos materiais considerados situavam-se a grandes distâncias do local da obra, resultando em grandes emissões por parte dos meios de transporte que acabariam por anular, em parte, o benefício da própria reciclagem dos materiais.

Assim, a EMARVR funciona como fornecedor de latas e garrafas de vidro para a construção das paredes interiores *Earthship* e como destino final para todas as soluções construtivas.

Os sistemas técnicos de cada conceito são também incluídos no cálculo do impacte ambiental total de cada edifício, para que sejam obtidos dois valores de impacte total: um considerando os sistemas e outro em que estes não são considerados, para cada edifício.

4.3.3. Estimativa do tempo de retorno

Os sistemas técnicos de cada conceito incluídos no cálculo do impacte ambiental total de cada edifício tornam-no alvo de estudo comparativo aquando da realização da estimativa do tempo de retorno.

Esta estimativa do tempo de retorno do edifício *Earthship* relativamente ao convencional é realizada com base no valor de *GWP* de cada um dos edifícios, incluindo os seus sistemas técnicos, no ano zero. Registado este valor, é necessário avaliar os consumos em cada edifício ao longo da sua vida útil, que como foi anteriormente referido, é de 50 anos.

Para esta análise não foram contabilizadas as emissões associadas a operações de manutenção, uma vez que, como foi referido anteriormente, não existem dados acerca da necessidade de manutenção dos edifícios *Earthship*, acabando por também não se considerar a do edifício convencional.

Através do *software SimaPro*[®], é possível determinar o *GWP* associado ao consumo de 1kWh de energia em emissões de CO₂ através do método CML Baseline 2000, para qualquer fonte de energia, seja ela eletricidade ou gás. O valor obtido é multiplicado pela vida útil do edifício e pelo consumo total anual do edifício relativamente a cada fonte de energia, em kWh/ano de forma a obter-se o consumo total em kg CO₂ eq ao longo de toda a vida útil do edifício.

O valor do consumo total do edifício em kg de CO₂ eq/ano é obtido da mesma forma, porém não se multiplica o valor unitário do consumo de energia pela vida útil, mas sim apenas pelo consumo total em kWh/ano, obtendo-se o consumo em kg CO₂ eq/ano. Com isto obtém-se o valor de *GWP* de cada edifício para cada ano da sua vida útil.

No caso do edifício *Earthship*, os sistemas de climatização de apoio usufruem de energias não renováveis nos casos em que a produção de eletricidade por parte dos painéis fotovoltaicos não é suficiente para assegurar as necessidades da habitação. O valor do consumo total resultante na simulação da folha de cálculo do REH correspondente a este tipo de sistemas, ao contrário do sistema de apoio de aquecimento de AQS cujo valor se encontra ponderado com a produção do sistema solar térmico, não contabiliza o painel fotovoltaico como fonte de energia. Como tal, ao total valor do consumo dos sistemas de climatização de apoio será retirado o valor da produção do painel fotovoltaico do edifício que lhes fornece energia primeiramente. O valor resultante desta subtração corresponde aos kWh/ano consumidos por estes sistemas de apoio quando estes utilizam fontes de energia externas ao edifício, ou seja, não resultantes da sua produção, por insuficiência. No caso, a fonte seria um gerador que iria produzir a eletricidade necessária ao seu funcionamento.

Este valor será então o valor de cálculo corresponde ao consumo final dos sistemas de climatização de apoio que têm como fonte a eletricidade.

Através dos dados obtidos é possível construir um gráfico para estimar a intersecção dos dois segmentos de reta resultantes que caracterizam a evolução do consumo energético com base nas necessidades de cada edifício. Esta intersecção corresponderá ao ano a partir do qual passará a haver retorno por optar por sistemas técnicos de fonte de energia renovável, no sistema *Earthship*, comparativamente à adoção de sistemas convencionais no edifício convencional.

O gráfico referido será apresentado no Capítulo 5 e alvo de discussão de resultados ao longo do Capítulo 6.

4.3.4. Desempenho económico

O desempenho económico de um edifício é usualmente obtido considerando os custos associados à sua construção e manutenção ao longo da sua vida útil. Contudo, devido à ausência de informação conclusiva acerca da necessidade de manutenção de certos materiais que integram as soluções *Earthship* e respetivos custos, a análise comparativa do desempenho económico de ambos os edifícios deverá incidir apenas sobre os custos de construção de cada um, respetivamente.

A inexistência de certas soluções construtivas na sua íntegra para obtenção direta do custo total no Gerador de Preços do *CYPE*[®], que será a ferramenta utilizada para a obtenção de custos, implica a repartição de custos totais de soluções semelhantes, substituindo os materiais não utilizados pelos inexistentes e obtendo-se custos de construção aproximados.

Obtidos os custos totais de cada edifício, procede-se à normalização dos valores. O valor normalizado do custo de cada edifício corresponde ao valor do desempenho/impacte económico (I_E).

A construção de um edifício com base no conceito *Earthship* pode conduzir a poupanças de até 20% face ao custo dos edifícios convencionais, no entanto esta poupança varia consoante a

localização geográfica, a arquitetura do edifício, os materiais selecionados e até mesmo os fornecedores escolhidos (Earthship Biotecture 2016b).

Contudo, este caso de estudo abordado é um bom exemplo de como nem sempre o uso de materiais reciclados resulta numa poupança imediata e a este proporcional. Os resultados que ilustram esta ausência inesperada de poupança na construção de um modelo *Earthship* face a um modelo convencional com a mesma planta apresentam-se no Capítulo 5.

Os preços dos equipamentos não serão contabilizados para a análise do desempenho económico dos edifícios.

4.3.5. Nota Sustentável dos edifícios

A nota sustentável (NS) dos edifícios é o valor que sintetiza o desempenho global de um determinado edifício num único valor através da consideração do seu desempenho em parâmetros individuais. Assim, são atribuídos pesos aos desempenhos individuais do edifício, ao nível ambiental, funcional e económico para a obtenção do seu desempenho global. Implementando o conceito de sustentabilidade nesta avaliação, pretende-se compatibilizar ao máximo o meio ambiente com a construção dos edifícios prioritariamente, assegurando o desempenho funcional satisfatório e apresentando uma relação/custo benefício satisfatória. Assim, para a determinação da NS, através aplicação da metodologia MARS-SC, são atribuídos os pesos referidos na Tabela 4.8 para cada indicador de desempenho (Bragança et al. 2006).

Tabela 4.8: *Peso dos indicadores de desempenho na atribuição da nota sustentável dos edifícios na aplicação da metodologia MARS-SC (Bragança et al. 2006)*

Indicador de desempenho (I_i)	Peso (W_i)
<i>Ambiental</i>	0,40
<i>Funcional</i>	0,40
<i>Económico</i>	0,20

Atribuídos os pesos, é possível calcular o valor da nota sustentável (NS) através da expressão 4.9.

$$NS = W_A \times I_A + W_F \times I_F + W_E \times I_E \quad (4.9)$$

Em que:

- W_A - Peso do indicador de desempenho ambiental na nota sustentável do edifício, [%];
- I_A - Desempenho ambiental do edifício;
- W_F - Peso do indicador de desempenho funcional na nota sustentável do edifício, [%];
- I_F - Desempenho funcional do edifício;
- W_E - Peso do indicador de desempenho económico na nota sustentável do edifício, [%];
- I_E - Desempenho económico do edifício (Mateus & Bragança 2006).

É importante referir que para o cálculo da NS de cada um dos edifícios, não são contabilizados sistemas técnicos por uma questão de uniformização, uma vez que não foram contabilizados os seus custos no desempenho económico.

5. RESULTADOS

5.1. Resultados do comportamento termo-energético do edifício

5.1.1. Coeficiente de transmissão térmica

a) Coeficientes de transmissão térmica das soluções do sistema *Earthship*

Uma vez estabelecida a metodologia de cálculo para a obtenção do coeficiente de transmissão térmica para cada solução construtiva, é possível obter-se os resultados para cada solução do sistema *Earthship*. Relembra-se que as soluções construtivas relativas a pavimentos serão as mesmas para ambos os casos em estudo e encontram-se descritas ao longo do Capítulo 3.

Na Tabela 5.1 encontram-se os resultados obtidos para os valores de coeficiente de transmissão térmica de cada solução construtiva da envolvente exterior, incluindo os elementos em contacto com o solo, do sistema *Earthship*, assim como a sua respetiva verificação relativamente aos valores de U_{ref} para as três zonas climáticas do país referidos anteriormente na Tabela 4.2.

Na tabela do Anexo IX é possível consultar os valores das variáveis consideradas que levaram à obtenção destes resultados.

Na Tabela 5.1 encontra-se apenas um único valor para o coeficiente de transmissão térmica da parede exterior de pneus enterrada, uma vez que este valor não varia consideravelmente com as dimensões do pneu. Como tal, colocou-se apenas o valor da dimensão de pneus utilizada para a construção das paredes enterradas deste edifício em altura, neste caso R14. Contudo, os valores obtidos para as restantes dimensões encontram-se também disponíveis para consulta na tabela do Anexo IX.

Tabela 5.1: Valores do U obtidos para as soluções construtivas do sistema Earthship

Solução construtiva		U	U_{ref}		
			<i>I1</i>	<i>I2</i>	<i>I3</i>
			<i>Elementos opacos verticais</i>		
			0,40	0,35	0,30
<i>Paredes exteriores</i>	<i>Parede de pneus R14 (enterrada)</i>	0,20	Cumpre!	Cumpre!	Cumpre!
	<i>Parede exterior da zona verde com pneus R15</i>	0,18	Cumpre!	Cumpre!	Cumpre!
			<i>Elementos opacos horizontais</i>		
			0,35	0,30	0,25
<i>Cobertura</i>		0,52	Não cumpre!	Não cumpre!	Não cumpre!
<i>Pavimentos</i>	<i>Pavimento cerâmico</i>	0,62	Não cumpre!	Não cumpre!	Não cumpre!
	<i>Pavimento em madeira</i>	0,33	Cumpre!	Não cumpre!	Não cumpre!
	<i>Pavimento das células botânicas</i>	0,42	Não cumpre!	Não cumpre!	Não cumpre!

b) Coeficientes de transmissão térmica das soluções do sistema Convencional

Na Tabela 5.2 encontram-se os resultados obtidos para os valores de coeficiente de transmissão térmica de cada solução construtiva da envolvente exterior do sistema convencional, assim como a sua respetiva verificação relativamente aos valores de U_{ref} para as três zonas climáticas do país referidos anteriormente na Tabela 4.2.

Na tabela do Anexo X é possível consultar os valores considerados para os parâmetros que levaram à obtenção destes resultados.

Tabela 5.2: Valores do U obtidos para as soluções construtivas do sistema Convencional

Solução construtiva		U	U_{ref}		
			$I1$	$I2$	$I3$
			<i>Elementos opacos verticais</i>		
			0,40	0,35	0,30
<i>Parede exterior</i>		0,48	Não cumpre!	Não cumpre!	Não cumpre!
			<i>Elementos opacos horizontais</i>		
			0,35	0,30	0,25
<i>Cobertura</i>		0,54	Não cumpre!	Não cumpre!	Não cumpre!
<i>Pavimentos</i>	<i>Pavimento cerâmico</i>	0,62	Não cumpre!	Não cumpre!	Não cumpre!
	<i>Pavimento em madeira</i>	0,33	Cumpre!	Não cumpre!	Não cumpre!
	<i>Pavimento das células botânicas</i>	0,42	Não cumpre!	Não cumpre!	Não cumpre!

5.1.2. Certificação energética dos edifícios

a) Inércia térmica

a.1) Inércia térmica do edifício *Earthship*

Através dos valores necessários ao cálculo da inércia térmica, também disponíveis na tabela do Anexo IX, e sabendo que a área de pavimento útil do edifício é de 164,62 m², é possível determinar a inércia térmica do edifício e classificá-la de acordo com a Tabela 4.3.

O valor obtido é de 362,694 kg/m², o que corresponde a uma inércia térmica média.

a.2) Inércia térmica do edifício Convencional

Através dos valores necessários ao cálculo da inércia térmica, disponíveis na tabela do Anexo X, e sabendo que a área de pavimento útil do edifício é de 164,62 m², tal como para o edifício *Earthship*, é possível determinar a inércia térmica do edifício e classificá-la de acordo com a Tabela 4.3.

Assim, efetuados os cálculos através do procedimento descrito, obtém-se o valor de 394,312 kg/m² o que corresponde também a uma inércia térmica média, tal como no edifício *Earthship*. Apesar de o valor ser ligeiramente superior, denota-se que a inércia térmica do edifício convencional está mais próxima de ser classificada como forte, isto deve-se ao facto de os elementos da envolvente interior e cobertura do edifício convencional possuírem um peso elevado quando comparados aos mesmos elementos no edifício *Earthship*. Assim, o balanço entre a leveza destes elementos face às paredes exteriores do edifício *Earthship* de massa muito elevada, resultam numa massa ainda assim inferior à massa total do edifício convencional.

b) Ventilação

b.1) Resultado do balanço de energia em Beja

Através da folha de cálculo da aplicação LNEC, é possível estimar o caudal mínimo de ventilação e o balanço de energia do edifício. Neste caso, na Tabela 5.3 são apresentados os valores obtidos para a localização selecionada em Beja para a construção de ambos os edifícios e posterior comparação.

Tabela 5.3: Resultados do balanço de energia em Beja

Balanço de energia do edifício	
<i>R_{ph,i} (h⁻¹) - Aquecimento</i>	1,87
<i>R_{ph,v} (h⁻¹) - Arrefecimento</i>	1,87
Caudal mínimo de ventilação	
<i>R_{ph} estimada em condições nominais (h⁻¹)</i>	0,43
<i>Requisito mínimo de ventilação (h⁻¹)</i>	0,40

Satisfazendo o critério R_{ph} mínimo.

b.2) Resultado do balanço de energia em Vila Real

Na Tabela 5.4 são apresentados os valores obtidos para a localização selecionada em Vila Real para a construção de ambos os edifícios e posterior comparação.

Tabela 5.4: Resultados do balanço de energia em Vila Real

Balanço de energia do edifício	
<i>R_{ph,i} (h⁻¹) - Aquecimento</i>	1,89
<i>R_{ph,v} (h⁻¹) - Arrefecimento</i>	1,89
Caudal mínimo de ventilação	
<i>R_{ph} estimada em condições nominais (h⁻¹)</i>	0,55
<i>Requisito mínimo de ventilação (h⁻¹)</i>	0,40

Satisfazendo o critério R_{ph} mínimo.

c) Sistemas técnicos

Através da folha de cálculo para a Quantificação do contributo de sistemas para aproveitamento de Fontes de Energia Renováveis da Direção-Geral de Energia e Geologia, foram determinados os valores dos painéis fotovoltaicos e coletores solares para os respetivos edifícios e localizações.

Os valores de potência, eficiência, consumo e fração servida de cada sistema encontram-se na Tabela 5.5, de forma resumida, assim como a quantidade de produção dos sistemas renováveis e respetivas áreas. Estes valores são introduzidos no REH e constituem dados fundamentais à obtenção da classe energética de cada edifício.

Tabela 5.5: Sistemas técnicos e as suas propriedades

Sistema			Beja		Vila Real	
			<i>Earthship</i>	<i>Convencional</i>	<i>Earthship</i>	<i>Convencional</i>
Painel fotovoltaico	Área (m ²)		14,3	-	14,3	-
	Autoconsumo (kWh/ano)		377	-	349	-
	Produção total (kWh/ano)		1626	-	1429	-
	Produção armazenada em baterias (kWh/ano)		975,6	-	857,4	-
	Parcela afeta à função (0 a 1)	Aquecimento	0,50	-	0,50	-
		Arrefecimento	0,50	-	0,50	-
Função		Aquecimento/ Arrefecimento	-	Aquecimento/ Arrefecimento	-	
Sistema solar térmico	Área (m ²)		4,85	2,60	4,85	2,60
	Produção (kWh)		2191	1657	2011	1449
	Parcela afeta à função (0 a 1)		1,00	1,00	1,00	1,00
	Função		AQS	AQS	AQS	AQS
Radiadores ou acumuladores fixos	Potência (kW)		2,00	2,00	2,00	2,00
	Eficiência		1,00	1,00	1,00	1,00
	Fração servida		1,00	1,00	1,00	1,00
	Fonte		Eletricidade	Eletricidade	Eletricidade	Eletricidade
	Função		Aquecimento	Aquecimento	Aquecimento	Aquecimento
	Consumo (kWh/ano)		7539,19	3473,29	8767,68	8971,37
Unidades split (ar-ar)	Eficiência		3,00	3,00	3,00	3,00
	Potência (kW)		5,00	5,00	5,00	5,00
	Fração servida		1,00	1,00	1,00	1,00
	Fonte		Eletricidade	Eletricidade	Eletricidade	Eletricidade
	Função		Arrefecimento	Arrefecimento	Arrefecimento	Arrefecimento
	Consumo (kWh/ano)		4786,20	4874,84	3691,17	3765,76
Esquentador	Eficiência		0,89	-	0,89	-
	Potência (kW)		9,00	-	9,00	-
	Fração servida		1,00	-	1,00	-
	Fonte		Gás butano	-	Gás butano	-
	Função		AQS	-	AQS	-
	Consumo		209,31	-	411,56	-
Termoacumulador	Eficiência		-	0,95	-	0,95
	Potência (kW)		-	-	-	-
	Fração servida		-	1,00	-	1,00
	Fonte		-	Eletricidade	-	Eletricidade
	Função		-	AQS	-	AQS
	Consumo (kWh/ano)		-	758,20	-	758,20

Apesar de essa função não ser aqui contabilizada, os painéis fotovoltaicos fornecem toda a energia elétrica ao edifício *Earthship* na situação real, e não apenas a necessária à climatização.

d) Resultados da avaliação do comportamento energético

d.1) Avaliação do comportamento energético do edifício *Earthship*

Com base no preenchimento de todos os parâmetros da folha de cálculo de aplicação do REH é possível obter uma classificação energética do edifício em estudo e a verificação das necessidades nominais anuais de energia face aos respetivos valores de referência através do balanço energético, tendo em conta a sua localização, que no caso é variável, e segundo a qual variam os dados climáticos.

Assim, nas tabelas 5.6 e 5.7 apresentam-se os valores obtidos para o balanço energético e respetiva classificação do edifício *Earthship* quando localizado em Vila Real e em Beja, respetivamente. A respetiva análise dos resultados obtidos será efetuada ao longo das conclusões no Capítulo 6.

Tabela 5.6: Resultados do balanço energético do edifício Earthship em Vila Real

Indicadores energéticos	Valor	Referência	Verificação	
<i>Nic</i>	53,26	68,79	Cumpre!	
<i>Nvc</i>	67,27	18,72	Não cumpre!	
<i>Qa</i>	2377	2377	-	
<i>Eren</i>	2868	1448	-	
<i>Ntc</i>	178,69	203,78	Cumpre!	
				<i>Ntc/Nt</i>
				0,88
				Classe energética
				B ⁻

Tabela 5.7: Resultados do balanço energético do edifício Earthship em Beja

Indicadores energéticos	Valor	Referência	Verificação	
<i>Nic</i>	45,80	59,39	Cumpre!	
<i>Nvc</i>	87,22	30,57	Não cumpre!	
<i>Qa</i>	2377	2377	-	
<i>Eren</i>	3157	1448	-	
<i>Ntc</i>	173,46	211,94	Cumpre!	
				<i>Ntc/Nt</i>
				0,82
				Classe energética
				B ⁻

Os valores de $E_{ren,ext}$ e W_{vm} não se apresentam nas tabelas uma vez que, como foi anteriormente justificado, são iguais a zero.

d.2) Avaliação do comportamento energético do edifício Convencional

Com base no preenchimento de todos os parâmetros da folha de cálculo de aplicação do REH para o edifício convencional, foram obtidos os valores do balanço energético do edifício apresentados nas tabelas 5.8 e 5.9 aquando da sua localização em Vila Real e

Beja, respetivamente. A respetiva análise dos resultados obtidos será também efetuada ao longo do Capítulo 6.

Tabela 5.8: Resultados do balanço energético do edifício Convencional em Vila Real

Indicadores energéticos	Valor	Referência	Verificação	
<i>Nic</i>	54,50	66,91	Cumpre!	
<i>Nvc</i>	68,63	18,72	Não cumpre!	
<i>Qa</i>	2377	2377	-	
<i>Eren</i>	1449	1448	-	
<i>Ntc</i>	208,27	220,88	Cumpre!	
			<i>Ntc/Nt</i>	Classe energética
			0,94	B ⁻

Tabela 5.9: Resultados do balanço energético do edifício Convencional em Beja

Indicadores energéticos	Valor	Referência	Verificação	
<i>Nic</i>	21,10	39,03	Cumpre!	
<i>Nvc</i>	88,84	30,57	Não cumpre!	
<i>Qa</i>	2377	2377	-	
<i>Eren</i>	1657	1656	-	
<i>Ntc</i>	138,29	161,04	Cumpre!	
			<i>Ntc/Nt</i>	Classe energética
			0,86	B ⁻

5.2. Resultados da análise do impacto de ciclo de vida

5.2.1. Desempenho funcional

a) Desempenho funcional do edifício *Earthship*

A Tabela 5.10 apresenta o resultado obtido para o coeficiente de transmissão térmica global do edifício *Earthship*, através da ponderação do coeficiente de transmissão térmica da cobertura e da parede exterior enterrada pelas suas respetivas contribuições para as perdas de calor do edifício através da envolvente exterior.

Tabela 5.10: U_{global} do edifício *Earthship*

Elemento	Peso percentual no edifício % (W_i)	Coefficiente de transmissão térmica (U_i)
<i>Cobertura</i>	42	0,52
<i>Parede Exterior</i>	58	0,20
U_{global}	0,34	

Através da normalização do valor de U_{global} com o mesmo valor obtido para o edifício convencional, obteve-se um valor de desempenho funcional (I_F) de 1.

b) Desempenho funcional do edifício Convencional

O coeficiente de transmissão térmica global do edifício convencional é determinado também contabilizando a mesma contribuição de cada solução construtiva para as perdas de calor do edifício. A Tabela 5.11 apresenta o resultado obtido para U_{global} com base nos valores de coeficiente de transmissão térmica da cobertura e das paredes exteriores convencionais.

Tabela 5.11.: U_{global} do edifício Convencional

Elemento	Peso percentual no edifício % (W_i)	Coefficiente de transmissão térmica (U_i)
<i>Cobertura</i>	42	0,54
<i>Parede Exterior</i>	58	0,48
U_{global}	0,50	

Através da normalização do valor de U_{global} com o mesmo valor obtido para o edifício *Earthship*, obteve-se um valor de desempenho funcional (I_F) de 0.

5.2.2. Desempenho ambiental

a) Desempenho ambiental do edifício *Earthship*

Após a normalização dos valores, verifica-se que o impacto ambiental total do edifício *Earthship* é de 0,50 incluindo os sistemas técnicos, e de 0,52 sem os contabilizar, tendo em conta as 5 categorias ambientais pela metodologia de análise *CML Baseline 2000* e a categoria de energia ENR pelo *Cumulative Energy Demand*. Os impactos quantificados para cada solução que levaram à obtenção do impacto global após a sua normalização encontram-se nas tabelas dos Anexos XIII e XIV, sendo que no primeiro se encontram detalhados os valores para cada solução do sistema *Earthship*.

b) Desempenho ambiental do edifício Convencional

O impacto ambiental total do edifício Convencional é de 0,50 contabilizando os sistemas técnicos, e de 0,48 sem os contabilizar. Os impactos quantificados para cada solução que levaram à obtenção do impacto global após a sua normalização encontram-se nas tabelas dos Anexos XIII e XIV, contudo é no Anexo XIV que se encontram detalhados os valores para as soluções para o sistema convencional.

5.2.3. Resultado da estimativa do tempo de retorno

O tempo de retorno, tal como referido no capítulo anterior, é determinado tendo por base o valor total de GWP de cada edifício, incluindo os respetivos sistemas técnicos, no ano zero. Estes valores encontram-se nos anexos XIII e XIV para o edifício *Earthship* e para o convencional, respetivamente.

A soma do GWP de todas as soluções construtivas e sistemas para cada edifício resulta num valor total de 30400 kg CO₂ eq para o edifício *Earthship* e de 34 829,5 kg CO₂ eq para o edifício convencional, no ano zero.

Na Figura 5.1 apresenta-se o gráfico que ilustra a evolução das emissões de CO₂ ao longo do ciclo de vida de cada um dos edifícios, com base os consumos energéticos anuais a eles associados.

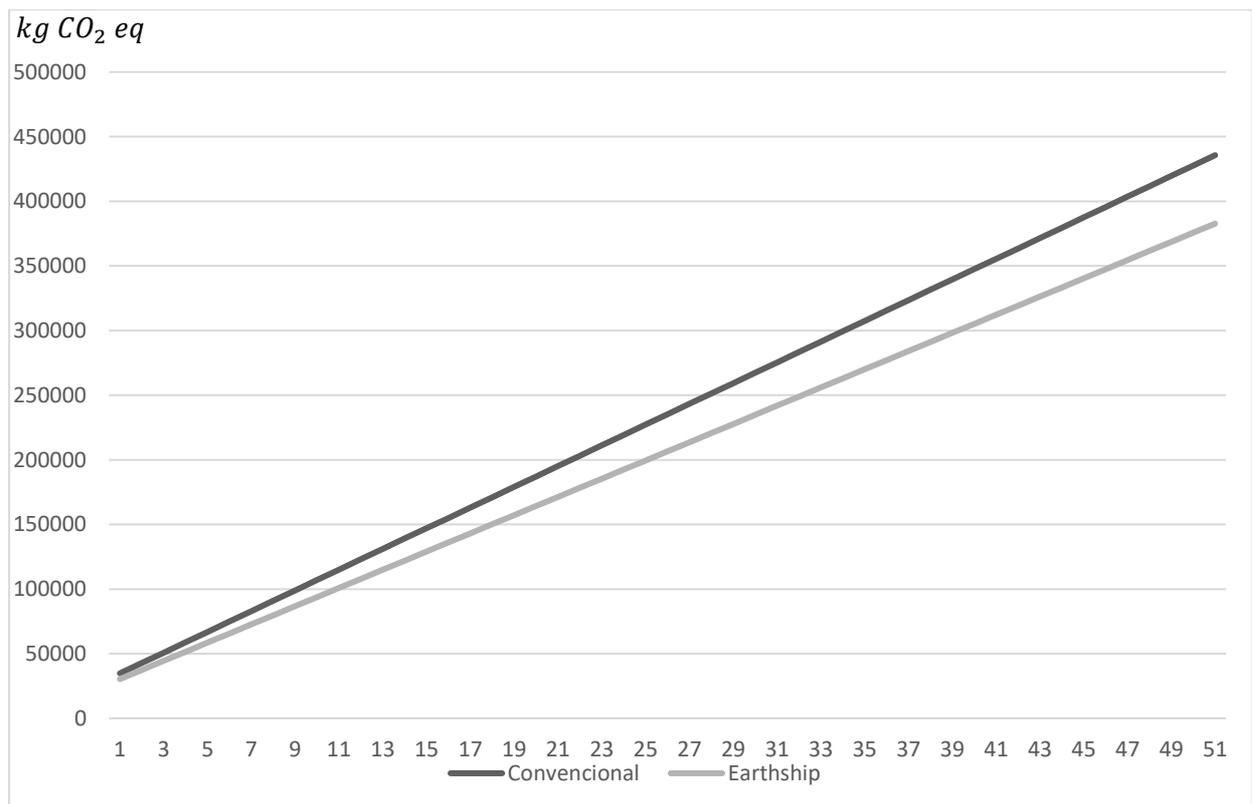


Figura 5.1: Evolução do CO₂ ao longo do ciclo de vida

No Anexo XV é possível consultar a tabela com os valores obtidos para cada ano da vida útil dos edifícios. Os valores que nele constam foram obtidos de acordo com os valores de GWP para 1kWh apresentados na Tabela 5.12, que permitiram calcular os valores das emissões anuais por parte da energia que foram incrementados ao valor do ano anterior de forma sucessiva, formando as retas que se podem ver no gráfico da Figura 5.1.

Tabela 5.12.: Valor de GWP para um kWh de energia

Energia	GWP (kg CO₂ eq)
<i>Eletricidade</i>	0,594
<i>Gás butano</i>	0,375

Verifica-se então uma emissão total de 352281,5 kg CO₂ eq ao longo do ciclo de vida do edifício *Earthship* e de 400810,5 kg CO₂ eq no edifício convencional.

5.2.4. Desempenho económico

a) Desempenho económico do edifício *Earthship*

O desempenho económico do edifício *Earthship*, tal como foi anteriormente mencionado, foi calculado considerando apenas o custo de construção e excluindo os custos de manutenção repartidos ao longo da sua vida útil, assim o desempenho económico do edifício será igual ao seu custo de construção total (*CC*) normalizado.

Assim, considerando a geometria do edifício e respetivas quantidades de material a ele associadas, através do custo individual de cada material obtido pelo Gerador de Preços do *CYPE*[®], determinou-se um custo de construção total de 74441,09 €, que se traduz num valor normalizado de 0, que corresponde ao valor que caracteriza o desempenho económico.

Os custos individuais que levaram à obtenção deste valor encontram-se na tabela do Anexo XVI.

b) Desempenho económico do edifício Convencional

O desempenho económico do edifício convencional, à semelhança do *Earthship*, corresponde também ao seu custo de construção total, uma vez que não são considerados os custos de

manutenção ao longo da vida útil devido à ausência de alguns dados, o que compromete a análise comparativa.

Assim, pela mesma metodologia anteriormente descrita, foi obtido um custo total de construção de 68433,72 € para o edifício convencional, que se traduz num valor normalizado de 1, correspondente ao valor que caracteriza o seu desempenho económico.

Os custos individuais que levaram à obtenção deste valor encontram-se na tabela do Anexo XVII.

5.2.5. Nota sustentável dos edifícios

a) Nota sustentável do edifício *Earthship*

Com base nos valores obtidos ao longo deste capítulo e na expressão de cálculo 4.9, considerando o desempenho ambiental do edifício sem sistemas técnicos, uma vez que estes também não são considerados na determinação do desempenho económico, obteve-se uma NS de 0,61 para o edifício *Earthship*.

b) Nota sustentável do edifício Convencional

Da mesma forma, com base nos valores obtidos ao longo deste capítulo e na expressão de cálculo 4.9, obteve-se uma NS de 0,39 para o edifício convencional.

6. DISCUSSÃO DE RESULTADOS

6.1. Comportamento termo-energético dos edifícios

6.1.1. Coeficiente de transmissão térmica

Através da análise do comportamento térmico dos edifícios, foi possível verificar que, no que diz respeito ao coeficiente de transmissão térmica das soluções construtivas, o edifício *Earthship* permite uma melhor retenção do calor no seu interior do que o convencional, uma vez que os valores para ele obtidos são bastante inferiores. Conclui-se, portanto, que tem um melhor desempenho térmico neste aspeto na estação de aquecimento e inibe a entrada do calor na estação de arrefecimento, ou seja, dificulta as trocas de calor entre o ambiente interior e exterior.

De acordo com os resultados evidenciados nas tabelas 5.1 e 5.2 do Capítulo 5, é ainda possível concluir que as soluções adotadas para o pavimento, que são iguais para ambos os casos, nenhuma cumpre os valores máximos regulamentares à exceção do pavimento em madeira para a zona climática de inverno II. No entanto, para melhorar o seu desempenho térmico, e tornar a implementação destas soluções em obra legal, aconselha-se o acrescento de uma camada de isolamento térmico em cada um deles, à exceção do pavimento das células botânicas, uma vez que estas possuem a função de produzir vegetais, não tendo a necessidade de ser isoladas termicamente.

Ambas as soluções adotadas para a cobertura de cada edifício não verificam, sendo os valores obtidos muito superiores aos valores limite para todas as zonas climáticas. Este facto poderia ser contornado através do aumento da espessura do isolamento térmico, constituído por placas

de XPS de apenas 6 cm de espessura. Aplicadas estas medidas, estas soluções poderiam ser então implementadas, tornando o edifício regulamentar.

No que diz respeito às paredes exteriores, verifica-se que as soluções construtivas utilizadas para as paredes *Earthship* possuem um melhor desempenho térmico que as adotadas como soluções convencionais, sendo que estas últimas não verificam os valores limite máximo de coeficiente de transmissão térmica, apesar de ser por uma pequena diferença. Este facto não se deve apenas ao isolamento térmico utilizado, apesar de este contribuir para a obtenção de valores satisfatórios e ser necessário, mas também ao facto de a parede exterior de pneus e terra possuir uma elevada espessura, o que dificulta a passagem do calor através dela e por ter como seu constituinte maioritário a terra seca, que não é considerada um bom condutor de calor, de acordo com o seu valor de condutividade térmica médio, referido inicialmente. No entanto, a espessura da parede é algo que condiciona muito o resultado obtido, contudo as paredes *Earthship*, à exceção das que delimitam a zona verde, são paredes que se encontram em contato com o terreno, o que à partida prejudica o resultado do seu coeficiente de transmissão térmica, elevando o seu valor.

Para melhorar o desempenho da parede exterior convencional, aconselha-se a substituição do pano de tijolo cerâmico por blocos em betão leve com agregados de argila expandida, blocos térmicos, na sua designação mais comum, e/ou o aumento do seu isolamento térmico pelo exterior de EPS.

6.1.2. Comportamento térmico dos edifícios

Relativamente ao comportamento térmico dos edifícios, verifica-se que para ambas a classe de certificação energética obtida foi a B⁻ que corresponde à classe mínima regulamentar, isto é, edifícios novos ou sujeitos a grandes intervenções, não podem possuir uma classe a esta inferior. Contudo, uma vez que o valor de N_{vc} não verifica o respetivo valor de referência, este não é na verdade regulamentar e não pode ser implementado de forma legal.

Como tal, conclui-se que, a não verificação dos valores de coeficiente de transmissão térmica das soluções construtivas adotadas e do valor das necessidades energéticas na estação de arrefecimento (N_{vc}) face ao seu valor de referência, não impediram a obtenção de uma

certificação energética regulamentar para ambos os edifícios, neste caso a mínima, o que indica que, quando implementadas as medidas necessárias à verificação destes valores, poderiam ser obtidas classes melhores para soluções otimizadas e o edifício seria regulamentar.

Contudo, face aos valores obtidos para o rácio de classificação energética, mesmo os edifícios não sendo regulamentares, é possível verificar que o edifício *Earthship* obteve valores inferiores aos do convencional para ambas as localizações, estando mais perto de atingir a classe B através da implementação das soluções de melhoria que o tornariam então regulamentar.

Conclui-se então que os sistemas técnicos são um fator de peso na determinação da classe, uma vez que determinam os resultados obtidos para as necessidades energéticas.

Os gráficos das figuras 6.1 e 6.2 ilustram os valores obtidos para as necessidades de energia para cada edifício nas localizações inicialmente consideradas.

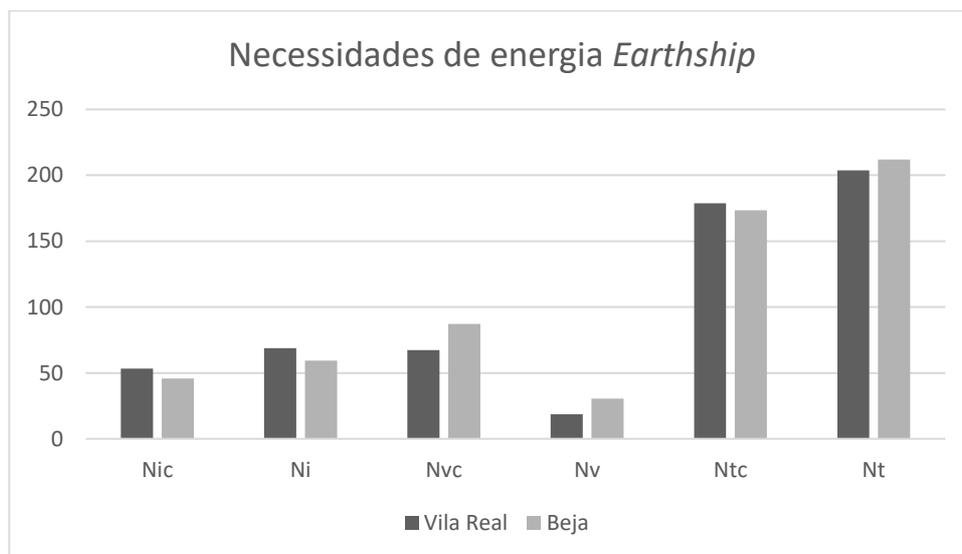


Figura 6.1: Valores obtidos para as necessidades energéticas do edifício *Earthship* localizado em Beja e Vila Real

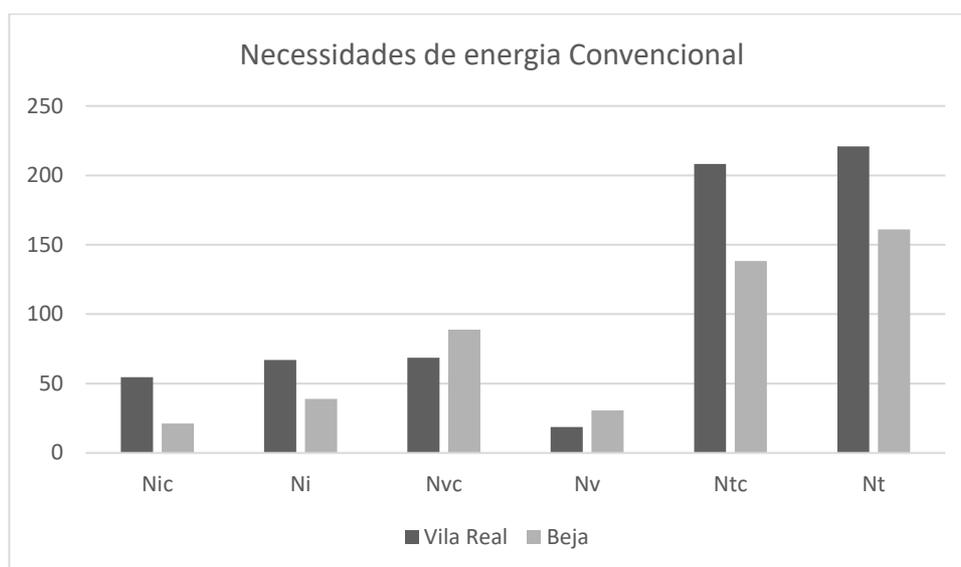


Figura 6.2: Valores obtidos para as necessidades energéticas do edifício convencional localizado em Beja e Vila Real

Relativamente às necessidades energéticas, verifica-se que em ambos os casos em estudo, as necessidades energéticas da estação de arrefecimento não verificam face ao seu respetivo valor de referência, que corresponde ao seu máximo admissível. Este facto deve-se essencialmente à existência de envidraçados apenas nas fachadas a sul, o que potencia a absorção da energia solar, e um conseqüente aquecimento nas estações do ano em que o objetivo é evitá-lo. Uma forma de contornar este facto é através da colocação de dispositivos de proteção solar como palas horizontais e/ou através do recuo dos envidraçados que se encontram à face exterior das fachadas.

As restantes necessidades verificam os respetivos valores de referência, porém a diferença entre o valor das necessidades energéticas da estação de aquecimento e o respetivo valor de referência poderia ser aumentada através da opção por sistemas de aquecimento mais eficazes e menos poluentes, quer nos sistemas adotados no edifício convencional, quer no *Earthship* relativamente aos sistemas de apoio que recorrem a fontes de energia não renovável, de origem fóssil. Um exemplo deste tipo de sistemas seria a implementação de uma fonte de calor a biomassa, como uma lareira, que funcionasse como um recuperador de calor para aquecimento de AQS e também do edifício, para ambos os casos. Isto permitiria ainda a obtenção de rácios de classe energética menores e conseqüentemente de classes energéticas superiores.

Assim, relativamente à avaliação do comportamento térmico dos edifícios, verifica-se que ambos são muito equivalentes, apenas o valor do rácio de classe energética do edifício *Earthship* possui valores ligeiramente inferiores para ambas as localizações selecionadas em Beja e Vila Real, o que o torna um pouco mais próximo de atingir uma classe energética superior, assim que sejam aplicadas as medidas de melhoria propostas e se satisfaçam as condições que o tornam regulamentar.

Denota-se ainda a obtenção de um melhor rácio de classe energética para este edifício localizado em Beja, uma vez que existe uma maior exposição solar pois esta é uma região de invernos menos rigorosos, de melhor clima e temperatura média anual superior a Vila Real diminuindo as necessidades de aquecimento do edifício. Esta exposição solar possibilita o maior aproveitamento da energia solar por parte dos sistemas, conferindo maior autossuficiência ao edifício o que se faz com que se dispense mais frequentemente da utilização dos sistemas de apoio. Por outro lado, potencia os ganhos solares na estação de arrefecimento, o contribui para a obtenção de um valor para as necessidades energéticas da estação de arrefecimento extremamente elevado e de uma diferença também elevada face ao seu valor de referência, que não é verificado.

Esta situação, tal como anteriormente referido requer medidas de proteção dos envidraçados a sul ou até mesmo a substituição dos equipamentos de arrefecimento, considerados para efeito de cálculo com base no REH, por equipamentos mais eficazes. Também as medidas de melhoria implementadas para a verificação regulamentar dos coeficientes de transmissão térmica das soluções construtivas contribuiriam para a verificação do valor de N_{vc} .

Quanto ao edifício convencional, verifica-se a mesma situação face aos rácios e por uma diferença ainda mais evidente entre ambas as localizações, sendo que em Beja o edifício se encontra mais próximo de atingir a classe energética superior, assim que este seja também verificado como regulamentar após a implementação das respetivas soluções de melhoria.

As necessidades energéticas da estação de arrefecimento obtidas possuem valores muito próximos aos do edifício *Earthship* e também não verificam o respetivo valor de referência que é fixado para ambos os edifícios, uma vez que a sua geometria é a mesma, para ambas as localizações.

Verifica-se ainda que as necessidades globais nominais de energia primária para o distrito de Vila Real são muito superiores no edifício convencional face ao *Earthship*. Este facto deve-se essencialmente ao coeficiente de transmissão térmica das suas soluções construtivas ser em geral superior ao das soluções *Earthship*, o que possibilita maiores perdas de calor durante a estação fria, numa localização onde as temperaturas são, em média, baixas e o objetivo é reter o calor no interior dos edifícios de forma a proporcionar conforto térmico aos ocupantes.

Pelo contrário, em Beja verifica-se o oposto, a forte capacidade de retenção térmica do edifício *Earthship* evita a saída de calor por perdas, numa localização geográfica onde as necessidades de arrefecimento são superiores devido às temperaturas médias bastante mais elevadas do que em Vila Real. Isto justifica o facto de o valor obtido para as necessidades globais nominais de energia primária no distrito de Beja ser superior para o edifício *Earthship*.

6.2. Análise do impacte de ciclo de vida dos edifícios

6.2.1. Desempenho funcional dos edifícios

Relativamente ao desempenho funcional dos edifícios, é possível concluir, pelos valores calculados que o edifício *Earthship* apresenta melhor desempenho que o convencional, uma vez que apresenta um valor de desempenho maior, de 1, que corresponde a um coeficiente de transmissão térmica global inferior, traduzindo-se numa melhor retenção de calor, diminuindo as perdas através dos principais elementos da envolvente exterior em comparação, neste caso, a cobertura e as paredes exteriores, cada uma com o seu respetivo peso.

Assim, considerando os parâmetros funcionais em avaliação, que neste caso é apenas o isolamento térmico, o edifício *Earthship* apresenta melhor desempenho funcional, uma vez que apresenta um valor superior ao do convencional, que apresenta o valor 0.

6.2.2. Desempenho ambiental dos edifícios

Através da análise dos valores obtidos em 5.2.2 e detalhadamente apresentados nos Anexos XIII e XIV é possível concluir que, excluindo da análise do desempenho ambiental dos edifícios

os sistemas técnicos, considerados anteriormente e apresentados na Tabela 5.5, o sistema *Earthship* apresenta ligeiramente melhor desempenho ambiental, obtendo um valor de 0,52 que é mais próximo de 1 do que o obtido para o edifício convencional, que foi de 0,48. Assim, através da interpretação dos valores do impacto ambiental associado aos edifícios sem a contabilização dos sistemas, é possível concluir que, para os indicadores considerados para o cálculo do impacto, o desempenho ambiental do edifício *Earthship* é melhor que o do edifício convencional.

Contudo, os valores obtidos para cada indicador, incluindo os não considerados para o cálculo do I_A , apresentam-se nos gráficos das figuras 6.3 e 6.4 de forma comparativa para ambos edifícios considerando os respectivos sistemas técnicos e não considerando, respectivamente.

Pela análise dos valores de impacto obtidos na Figura 6.3 em cada indicador, é possível verificar que o *Earthship* apresenta valores de impacto superiores aos do convencional para 6 dos 8 indicadores determinados, dos quais 2 não são contabilizados no I_A , são eles o ADP e o ER, para os quais este apresenta também valores superiores. Contudo, o impacto ambiental total do edifício *Earthship* é inferior ao do edifício convencional, pois o valor do GWP obtido para este último é muito superior ao do *Earthship* e este é o indicador de maior peso na análise (38,1%).

Quando se efetua a mesma análise do desempenho ambiental dos edifícios incluindo os respectivos sistemas técnicos, verifica-se que os valores obtidos para o impacto ambiental de cada um deles é o mesmo, igual a 0,50.

Isto indica que o desempenho ambiental do edifício *Earthship* é influenciado negativamente pelos seus sistemas técnicos, diminuindo o valor do seu impacto relativamente ao obtido sem a contabilização dos sistemas, deixando o valor mais longe de 1.

Já o desempenho ambiental do edifício convencional é influenciado positivamente pela contabilização dos sistemas, aumentando o seu valor de 0,48 para 0,50.

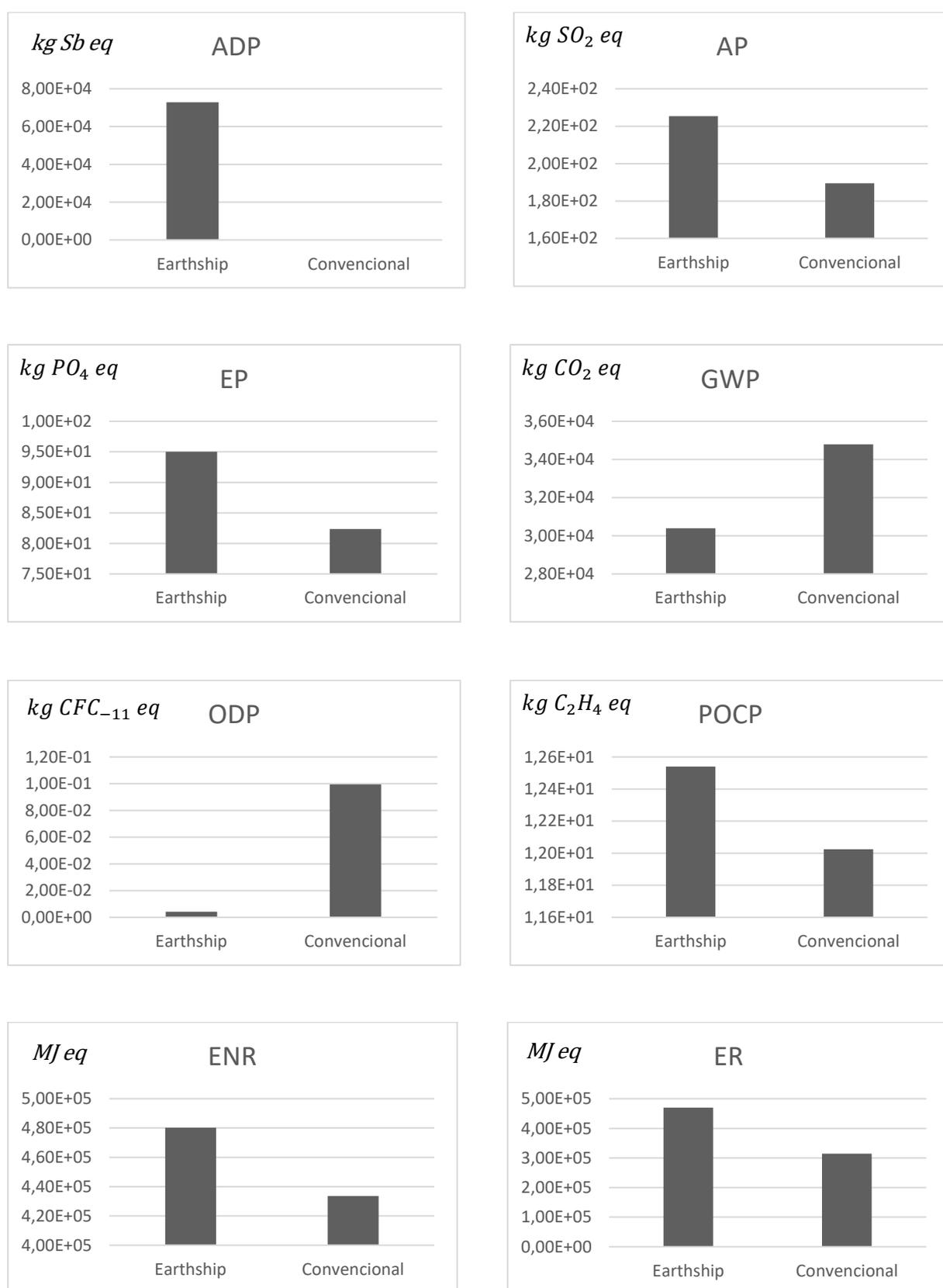


Figura 6.3: Resultados obtidos no SimaPro pelas duas metodologias para os 8 indicadores considerando os sistemas técnicos

Assim, pela análise dos valores obtidos na Figura 6.4, é possível concluir que, com a presença de sistemas técnicos, o valor do indicador de energia não renovável (ENR) do edifício *Earthship* aumenta consideravelmente face ao obtido pelo sistema convencional, sendo que este valor era ligeiramente superior sem a consideração dos sistemas. Também em todos os indicadores foram obtidos valores superiores para o *Earthship*, à exceção dos indicadores POCP e GWP.

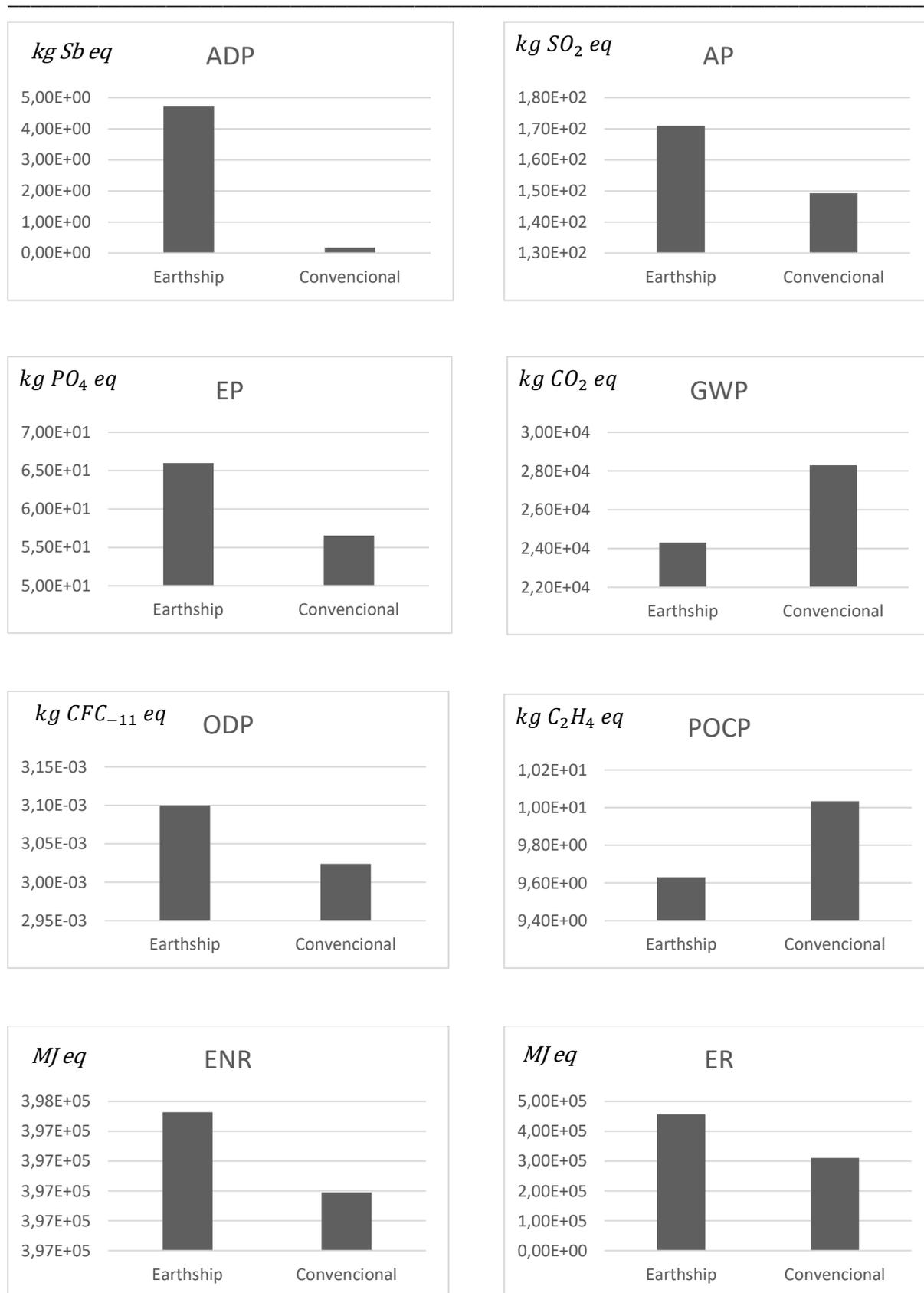


Figura 6.4: Resultados obtidos no SimaPro pelas duas metodologias para os 8 indicadores sem considerar os sistemas técnicos

Isto torna, o desempenho ambiental do *Earthship* equivalente ao do convencional, uma vez que se obtêm valores iguais para o seu impacte. Contudo, para ambos os casos, o potencial de aquecimento global do edifício *Earthship* é sempre inferior ao convencional, o que indica que a sua construção, com ou sem sistemas técnicos, emite menos CO₂, sendo este o indicador GWP é o de mais peso na análise efetuada pela metodologia MARS-SC.

Um menor impacte ambiental por parte do edifício *Earthship* face ao edifício convencional, excluindo os sistemas, era expectável uma vez que se opta pela utilização de materiais que não foram fabricados propositadamente para integrar soluções construtivas, mas foram sim recolhidos no seu fim de vida original, sendo para estes considerado apenas um processo de transporte e excluído o processo de fabrico. Contudo, estes impactes poderiam variar de forma positiva ou negativa consoante a alteração da localização do edifício, e conseqüentemente as distâncias aos fornecedores e às entidades encarregues do seu fim de vida.

Pelo contrário, a inclusão da utilização de sistemas técnicos que conferem autossuficiência, que nunca é totalmente assegurada, prejudica o desempenho ambiental do edifício, tornando o seu impacte ambiental igual ao do edifício convencional com os seus respetivos sistemas associados. Isto deve-se sobretudo ao facto de existirem sistemas de apoio no edifício *Earthship* que são accionados quando a energia produzida pelas fontes renováveis não é suficiente para assegurar a total autossuficiência da habitação. Assim, esta deve dispor do dobro dos sistemas de um edifício convencional, fabricados para esse propósito, enquanto que o convencional apenas possui um único conjunto que assegura a satisfação das necessidades de todos os ocupantes.

Isto faz com que a poluição gerada pelo processo de fabrico do total de sistemas de que dispõe o edifício *Earthship* seja superior do processo de fabrico dos sistemas necessários no edifício convencional, uma vez que o primeiro dispõe de mais sistemas.

Associado a isto, o fabrico de painéis com área suficiente para assegurar a satisfação do máximo possível das necessidades no edifício *Earthship* é por si próprio um processo tão ou mais poluente do que o fabrico de sistemas convencionais com a mesma função, anulando em parte a troca da utilização de combustíveis fósseis por energia renovável gerada na própria habitação.

6.2.3. Estimativa do tempo de retorno

Observando o gráfico da Figura 5.1 apresentado em 5.2.3 e os valores resultantes desta análise apresentados no Anexo XV, é possível verificar que os segmentos de reta correspondentes ao desempenho de cada edifício no gráfico não se cruzam ao longo de toda a vida útil do edifício.

Isto acontece pois o edifício *Earthship*, imediatamente após a sua construção, no ano zero, apresenta por si só um valor de GWP menor que o edifício convencional, isto significa que todo o processo de construção do edifício *Earthship* e a produção dos sistemas que serão utilizados ao longo da sua vida útil emitem menos quantidade de CO₂ que o convencional.

Também o valor do consumo total anual do edifício *Earthship* é menor que o do convencional, uma vez que nele é produzida energia solar que satisfaz parte das suas necessidades, reduzindo os consumos associados a fontes de energia externas e, na sua maioria, poluentes. Isto faz com que o desenvolvimento do gráfico resulte num afastamento das linhas em direção ao infinito, fazendo com que estas nunca se cruzem.

Assim, é possível concluir que, mantendo os mesmos sistemas e não considerando a necessidade de operações de manutenção dos edifícios, que é desconhecida, o consumo total ao longo dos 50 anos do edifício *Earthship* será de 352281,5 kg CO₂ eq, o que será sempre menor que o do convencional, estimado em 400810,5 kg CO₂ eq.

Como tal, verifica-se que o investimento inicial no edifício *Earthship* é compensador para o seu ciclo de vida logo desde o ano zero, no que diz respeito à poupança energética e à redução das emissões de CO₂ reduzindo assim o potencial de aquecimento global, relativamente ao ciclo de vida do edifício convencional.

6.2.4. Desempenho económico dos edifícios

Através da análise dos custos de construção de cada um dos edifícios, foi possível verificar que, contrariando as expectativas, a construção do edifício convencional acarreta menores custos do que a construção de um edifício *Earthship*.

À primeira vista seria expectável que se verificasse o contrário, uma vez que as soluções *Earthship* integram materiais que não possuem custos de aquisição a eles associados, como é o caso dos recicláveis. Contudo este facto deve-se essencialmente à grande variedade de materiais, e respetivas grandes quantidades, utilizados para os elementos das paredes exteriores e sobretudo, devido ao elevado movimento de terras que requer muitos custos de equipamentos e mão de obra. Este movimento de terras é muito superior ao efetuado para a construção do edifício convencional, por isso, mesmo não adquirindo terra de locais que não o terreno de implantação, os custos associados são elevados, uma vez que a terra é movimentada para abertura das valas de fundação, para enchimento de pneus e para aterro das paredes exteriores em grandes volumes.

Assim, após a normalização dos custos totais, foi obtido um valor de desempenho económico de 0 para o edifício *Earthship*, que é o que apresenta um maior custo total de construção, sendo por isso menos vantajoso no aspeto económico. Para o edifício convencional obteve-se o valor 1, que indica que esta é a opção mais económica, verificando-se assim o oposto.

6.2.5. Nota sustentável dos edifícios

Através dos valores obtidos para a NS dos edifícios, é possível concluir que o edifício *Earthship*, com uma NS de 0,61 apresenta um melhor desempenho global, uma vez que obteve um valor superior relativamente ao edifício convencional, para o qual se obteve uma NS de 0,39, considerando os pesos dos indicadores de desempenho referidos em 4.2.5.

Contudo, não devendo o valor de NS ser utilizado individualmente para caracterizar a sustentabilidade dos edifícios, uma vez que a compensação entre valores obtidos nos indicadores pode incorrer na obtenção de NS iguais para edifícios com comportamentos muito distintos ao nível dos diferentes indicadores de cada um, é possível afirmar que o edifício *Earthship* apresenta melhor desempenho global que o edifício convencional.

7. CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

7.1. Conclusões

O conceito *Earthship* é ainda praticamente desconhecido em Portugal, apesar de já existir uma academia representante da *Earthship Biotechture* no país, a *Earthship Biotechture Portugal*, porém revela-se um sistema irreverente que permite a obtenção de resultados tão bons quanto os sistemas convencionais utilizados em Portugal.

O estudo térmico de um edifício *Earthship* é algo complexo e que requer a contabilização de diversas vertentes que transcendem a área da Engenharia Civil. A zona verde deste tipo edifícios, sendo equiparada a uma estufa e aquecendo passivamente o edifício, implica que esta seja estudada como se de uma estufa se tratasse, com *softwares* apropriados que calculem os níveis de humidade e temperatura expectáveis no seu interior, assim como o risco de intoxicação no interior da habitação. Contudo, isso foi algo que não foi efetuado ao longo desta dissertação.

Existe ainda um longo caminho a percorrer no que diz respeito ao seu enquadramento legal embora não existam entraves explícitos à sua construção, contudo o seu conflito com a paisagem urbana portuguesa é ainda uma constante, sendo que a sua arquitetura invulgar padece de alguma adaptação ao meio e poderá impedir a adaptação do conceito a centros urbanos. O conceito de autossuficiência, mesmo esta não sendo assegurada a 100%, coloca entraves legais à sua implementação tendo por base no conceito original, uma vez que os edifícios de habitação, sempre que possuam acesso, devem ser conectados à rede pública elétrica e de abastecimento e drenagem de águas.

No entanto, uma vez que o objetivo do conceito não é a sua inserção nos meios urbanos, mas sim em locais remotos nos quais não seja possível aceder às redes públicas, este conceito pode vir a ser um meio económico de repovoação de terras no interior de Portugal.

Contudo, com base nas análises efetuadas ao longo desta dissertação foi possível verificar que nem sempre a ausência de custos de aquisição de materiais é sinónimo de custos de construção mais baixos, uma vez que estes edifícios implicavam custos mais elevados essencialmente devido à mão-de-obra e utilização de equipamentos, no entanto os custos com energia associados à sua utilização não foram contabilizados, assim como as poupanças a estes associadas. Porém, este é um fator variável, uma vez que o *Earthship* se insere também num conceito *DIY- Do it yourself*, que implica que os próprios futuros habitantes são capazes de a construir sem requerer a mão-de-obra especializada, o que viria a reduzir drasticamente os custos de construção deste edifício.

No entanto, é inegável que a autossuficiência é também sinónimo de poupança económica, na medida em que reduz o consumo energético, através da alimentação dos sistemas com energia renovável produzida pelos painéis de que a habitação dispõe. Isto conduz a uma poupança económica a longo prazo, quando comparada com os gastos mensais associados ao usufruto da rede pública, seja esta elétrica ou de abastecimento de água, por exemplo, uma vez que os custos de aquisição dos equipamentos.

Contudo, a renovação das baterias no caso dos *Earthships*, de 10 em 10 anos, acabam por comportar gastos de manutenção, que apesar de não terem sido aqui contabilizados, não são tão compensadores face às despesas distribuídas pela vida útil dos edifícios convencionais.

É também possível concluir que, embora a construção do edifício *Earthship* esteja associada a impactes ambientais menores e possua melhor desempenho funcional e termo-energético, os seus sistemas nem sempre correspondem às soluções mais amigas do ambiente. A utilização de baterias para armazenar a energia solar produzida pelos painéis fotovoltaicos implica elevadas emissões poluentes atmosféricas na sua produção e na sua deposição no fim de vida causa graves problemas de poluição hídrica e do solo, porém este fator não foi contabilizado, uma vez que o *software* utilizado para quantificação dos impactes não dispõe de baterias. No entanto, isto constitui um grave problema, uma vez que as baterias são renovadas a cada 10 anos para o

seu correto funcionamento, o que implica que ao longo da vida útil do edifício uma bateria deverá ser reposta 5 vezes, anulando em parte a troca do uso de energias fósseis pelas energias renováveis ao longo da sua vida útil.

Também as emissões associadas ao processo de fabrico de painéis solares em quantidade suficiente para tornar a moradia autossuficiente, dentro do máximo possível, acrescentando o fabrico dos seus sistemas de apoio, faz com que o desempenho ambiental global do edifício *Earthship* com sistemas, não difira do desempenho ambiental do edifício convencional com os seus sistemas, tendo em consideração os indicadores contabilizados na análise MARS-SC efetuada, não se verificando vantagem na adoção do conceito como um todo relativamente ao convencional, no que diz respeito à redução do impacte ambiental.

No entanto, contabilizando apenas o indicador do GWP aquando da estimativa do tempo de retorno do edifício *Earthship* face ao convencional, verifica-se que ao longo de toda a vida útil dos edifícios existe um menor consumo associado às emissões de CO₂ por parte do *Earthship*, tendo em consideração os equipamentos de que este dispõe e o facto de o valor de GWP para o *Earthship* com equipamentos no ano zero registar um valor também inferior ao registado para o mesmo no edifício convencional.

Contudo, não considerando os equipamentos, o impacte ambiental global verificado é menor para o *Earthship* do que para o convencional, sendo vantajoso para o meio ambiente construir um edifício *Earthship* em vez de um convencional.

Assim, conclui-se que é possível enquadrar um edifício *Earthship* padrão na legislação portuguesa para as construções e que é de facto vantajosa a sua construção, relativamente aos edifícios convencionais, no que diz respeito ao seu desempenho funcional e termo-energético, assim como ao desempenho ambiental do edifício por si só, quando excluídos os seus sistemas técnicos.

No entanto, esta nem sempre é a solução mais económica quando se requer a mão-de-obra especializada, implicando custos mais elevados do que a construção de edifícios convencionais e até de projeto, uma vez que existem em Portugal ainda poucos Engenheiros especializados na sua conceção.

A isto acrescenta-se ainda o facto de ainda não existirem sistemas de energia renovável adaptáveis a edifícios de habitação unifamiliar que possibilitem a total autossuficiência destes, o que implica a aquisição de sistemas de apoio que não são tão amigos do ambiente, tanto na sua utilização como na sua produção e, conseqüentemente fazendo com que uma habitação possua mais sistemas técnicos do que seria, à partida, necessário.

Em suma, avaliando o desempenho global do edifício *Earthship* através da nota sustentável a ele atribuída pela análise MARS-SC, conclui-se que, sem a contabilização dos sistemas técnicos, este conceito é uma solução globalmente mais sustentável do que o convencional.

De uma forma geral, existem ainda muitas limitações à implementação do conceito, contudo, com base nos estudos efetuados, estas não estão relacionadas com a construção dos edifícios em si, mas sim à sua ideologia de autossuficiência, existindo ainda um longo caminho a percorrer.

7.2. Desenvolvimentos futuros

O conceito *Earthship* é um conceito que continua em constante desenvolvimento e aperfeiçoamento, em busca da integração de novos materiais e métodos construtivos mais indicados e aperfeiçoados.

Existem inúmeros aspetos que carecem de estudos aprofundados na Engenharia Civil e que são de possível interesse e que não foram abordados ao longo desta dissertação, mas que são de verdadeira relevância para estudos futuros. A este nível pode-se destacar o estudo da capacidade de isolamento acústico das paredes interiores e exteriores *Earthship* que é algo que é ainda carente em estudos científicos e laboratoriais registados e/ou publicados. Adicionalmente destaca-se a aplicação nas paredes de caixas de ovos de papelão usadas como forma a potenciar as capacidades acústicas deste elemento construtivo, sendo que esta solução já se encontra em estudo.

A análise de ciclo de vida da implementação de edifícios *Earthship* nos grandes centros urbanos, fazendo o paralelismo entre a autossuficiência nestas zonas e a ligação à rede pública é um outro potencial estudo a efetuar futuramente.

No âmbito da dificuldade da aderência das argamassas à borracha dos pneus, revela-se interessante a investigação com objetivo à descoberta de argamassas de reboco mais ecológicas e de melhor aderência à borracha do pneu que, de preferência, integrem materiais reciclados diminuindo ainda mais a pegada ecológica.

Seria também interessante o estudo do aquecimento passivo do edifício a partir da zona verde, estudando-a como se de uma estufa se tratasse.

BIBLIOGRAFIA

- Al-Temeemi, A.A. & Harris, D.J., 2003. A guideline for assessing the suitability of earthsheltered mass-housing in hot-arid climates. Disponível em: <http://eds.b.ebscohost.com/eds/detail/detail?vid=1&sid=9014fead-3c9e-44ce-ab01-0a6c1565a963%40sessionmgr115&hid=126&bdata=Jmxhbmc9cHQYnImc2l0ZT1lZH MtbG12ZSZzY29wZT1zaXRl#AN=S037877880400009X&db=edselp> [Consultado a 5 de Abril, 2016].
- Andrew Elliot, 2013. FortCollinsSustainability: Earthships: cheap sustainable housing. Disponível em: <http://focosustainability.blogspot.pt/2013/02/earthships.html> [Consultado a 4 de Janeiro, 2017].
- Appleton, J., 2017. *EUROCÓDIGO 2- EN1992-1-1*.
- Arthur, S., 2001. Earthship Enterprise. Disponível em: <http://eds.b.ebscohost.com/eds/pdfviewer/pdfviewer?vid=1&sid=92859426-18fe-4487-abb5-476ee1d3fad1%40sessionmgr112&hid=108> [Consultado a 5 de Abril, 2016].
- Audrey Wright, 2014. Earthships — The Ultimate Green Homes – Architecture, landscape, urban design – Medium. Disponível em: <https://medium.com/architecture-landscape-urban-design/earthships-the-ultimate-green-homes-9f2d8fc516d1#.emelkfrz0> [Consultado a 4 de Janeiro, 2017].
- Azenha, M. et al., 2015. *Folha de Apoio às Aulas Práticas (5ª Edição)- Estruturas de Betão I*, BFGoodrich- Tires, 2016. Como ler a marcação de um pneu Dimensões e características da marcação do pneu. Disponível em: <http://www.bfgoodrich.pt/pt/conselhos/Saber-tudo-sobre-pneus/Como-ler-a-marcacao-de-um-pneu> [Consultado a 4 de Maio, 2016].
- Biotechure, E., 2012. An Earthship goes through the Hondo Fire! | Earthship Log. Disponível em: <https://web.archive.org/web/20120328180228/http://earthship.com/Earthship-Log/an-earthship-goes-through-the-hondo-fire.html> [Consultado a 4 de Janeiro, 2017].
- Earthship Biotechure Portugal, 2016. Curso de Especialização em Construção Sustentável 1. , Módulo 1.
- Earthship Biotechure Portugal, 2016. Curso de Especialização em Construção Sustentável 2. , Módulo 2.
- Earthship Biotechure Portugal, 2016. Curso de Especialização em Construção Sustentável 5. , Módulo 5.
- Bragança et al., 2006. SUSTENTABILIDADE DE SOLUÇÕES CONSTRUTIVAS.
- Bragança, L. & Mateus, R., 2006. Sustentabilidade de soluções construtivas.
- Bryan Welch, 2009. Earthships: The Power of Unconventional Ideas - Beautiful and Abundant

- Blog - MOTHER EARTH NEWS. Disponível em: <http://www.motherearthnews.com/green-homes/earthships-michael-reynolds-zb0z12fmzsto> [Consultado a 4 de Janeiro, 2017].
- Chelnys, 2015. Self Sustaining Farm House Has Architecture Design on Architecture Design Ideas - Chelnys Decoration #5000. Disponível em: <http://chelnys.com/5000/architecture/self-sustaining-farm-house-has-architecture-design/> [Consultado a 4 de Janeiro, 2017].
- Chiras, D. & Mother Earth News, 2005. Down to earth homes. Disponível em: <http://eds.b.ebscohost.com/eds/detail/detail?sid=cb469908-a011-4c8b-b30e-e05601196f51%2540sessionmgr115&vid=0&hid=121&bdata=Jmxhbmc9cHQYnImc2l0ZT1lZHMtbGl2ZSZzY29wZT1zaXRl#AN=edsgcl.97174867&db=edsgao> [Consultado a 5 de Abril, 2016].
- Custom Earth Sheltered Construction, 2009. Building Earth Sheltered, Green Roof and Subterranean Homes, Wine Cave. Disponível em: <http://www.customearthsheltered.com/farming-hotels> [Consultado a 4 de Janeiro, 2017].
- CYPE Ingenieros S.A., 2017. Gerador de preços para construção civil. Portugal. CYPE Ingenieros, S.A. Disponível em: <http://www.geradordeprecos.info/> [Consultado a 4 de Janeiro, 2017].
- David Hurtado, 2015. Earthships: arquitectura ecológica y sostenible. Disponível em: <http://www.cannabis.es/web/features/reportajes/158-earthships> [Consultado a 4 de Janeiro, 2017].
- Earthship Biotope, 2017a. Earthship | A Brief History of Earthships. Disponível em: <http://earthship.com/a-brief-history-of-earthships> [Consultado a 4 de Janeiro, 2017].
- Earthship Biotope, 2014. Earthship | Alberta Earthship Build Overview. Disponível em: <http://earthship.com/alberta-canada-global-model-build-summer-2014> [Consultado a 4 de Janeiro, 2017].
- Earthship Biotope, 2017b. Earthship | Construction Materials. Disponível em: <http://earthship.org/construction-materials> [Consultado a 4 de Janeiro, 2017].
- Earthship Biotope, 2017c. Earthship | Earthship Biotope Academy. Disponível em: <http://earthship.com/academy> [Consultado a 4 de Janeiro, 2017].
- Earthship Biotope, 2017d. Earthship | Earthship Village Ecologies. Disponível em: <http://earthship.com/Designs/earthship-village-ecologies> [Consultado a 4 de Janeiro, 2017].
- Earthship Biotope, 2015. Earthship | Organic Food Production. Disponível em: <http://earthship.com/Systems/organic-food-production> [Consultado a 4 de Janeiro, 2017].
- Earthship Biotope, 2017e. Earthship | Phoenix Earthship Nightly Rental. Disponível em: <http://earthship.com/Learn-More/phoenix-earthship> [Consultado a 4 de Janeiro, 2017].

-
- Earthship Biotope, 2017f. Earthship | Retrofit. Disponível em: <http://earthship.com/Designs/retrofit> [Consultado a 4 de Janeiro, 2017].
- Earthship Biotope, 2017g. Earthship | Simple Survival. Disponível em: <http://earthship.com/Designs/simple-survival> [Consultado a 4 de Janeiro, 2017].
- Earthship Biotope, 2017h. Earthship | Tire Building Code. Disponível em: <http://earthship.org/tire-building-code> [Consultado a 4 de Janeiro, 2017].
- Earthship Biotope, 2017i. Earthship | Tire Building Code. Disponível em: <http://earthship.com/tire-building-code> [Consultado a 4 de Janeiro, 2017].
- Earthship Biotope, 2017j. Earthship Biotope - Fotos. Disponível em: <https://www.facebook.com/earthship/photos/a.71706724723.76142.55295359723/10154439049924724/?type=3&theater> [Consultado a 4 de Janeiro, 2017].
- Earthship Biotope Portugal, 2017. Academia Earthship Biotope Portugal - Fotos. Disponível em: <https://www.facebook.com/academiaearthshipbiotopeportugal/photos/a.350813301775862.1073741828.350081491849043/506346339555890/?type=3&theater> [Consultado a 4 de Janeiro, 2017].
- Earthship Biotope Portugal, 2015. Earthship Funchal.
- ecoinvent, 2017. ecoinvent- the world's most consistent and transparent life cycle inventory database. Disponível em: <http://www.ecoinvent.org/> [Consultado a 1 de Março, 2017].
- EESC glossaries, 2017. HEAVYWEIGHT CONSTRUCTION | EESC Glossaries. Disponível em: <http://www.eesc.europa.eu/?i=glossaries.en.sustainable-terms.21562> [Consultado a 1 de Março, 2017].
- Ferreira, S. et al., 2015. *Avaliação do Ciclo de Vida de Soluções Construtivas*.
- Grindley, P.C. & Hutchinson, M., 1996. The thermal behaviours of an earthship. *Renewable Energy*, 8(1-4), pp.154-159. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0960148196888355> [Consultado a 28 de Fevereiro, 2016].
- Hippy, A.M., 2015. Design | A Modern Hippy. Disponível em: Ip, K. & Miller, A., 2009.
- Thermal behaviour of an earth-sheltered autonomous building – The Brighton Earthship. *Renewable Energy*, 34(9), pp.2037-2043. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148109000652> [Consultado a 16 de Fevereiro, 2016].
- IPMA, 2004. Normas Climatológicas de Beja, 1971/2000. Disponível em: <https://www.ipma.pt/pt/oclima/normais.clima/1971-2000/002/> [Consultado a 1 de Março, 2017].
-

- ITeCons & Universidade de Coimbra, 2017. Plataforma para a Eficiência Energética de Edifícios. Disponível em: <http://www.itecons.uc.pt/p3e/> [Consultado a 1 de Março, 2017].
- Karuna Farm, 2014. KARUNA FARM - A NATURAL LIFESTYLE EXPERIENCE. Disponível em: <http://www.karunafarm.in/earthships.html#.WG1z7vkgXIU> [Consultado a 4 de Janeiro, 2017].
- keywordsking, 2017. Rammed Earth Tire Construction. Disponível em: <http://www.keywordsking.com/cmFtbWVkiGVhcnRoIHRpcmUgY29uc3RydWN0aW9u/> [Consultado a 4 de Janeiro, 2017].
- Lacarrière, B. et al., 2015. Emergy assessment of the benefits of closed-loop recycling accounting for material losses. *Ecological Modelling*, 315, pp.77–87. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0304380015000344> [Consultado a 16 de Janeiro, 2016].
- Linda S. Velazquez, 2014. Greenroofs.com Explores Middle-earth at Hobbiton, NZ - Greenroofs.com: Sky Gardens Blog. Disponível em: <http://www.greenroofs.com/blog/2014/12/30/greenroofs-com-explores-middle-earth-at-hobbiton-nz/> [Consultado a 4 de Janeiro, 2017].
- Lipor, 2017. Sabia que o vidro demora até 1 milhão de anos a decompor-se na natureza? - Lipor. Disponível em: <http://www.lipor.pt/pt/mitos-urbanos-da-reciclagem/sabia-que-o-vidro-demora-ate-1-milhao-de-anos-a-decompor-se-na-natureza/> [Consultado a 4 de Janeiro, 2017].
- Ludwig, B. & Everson, R., 2017. Aardskip.
- Mateus, R. & Bragança, L., 2006. *Tecnologias construtivas para a sustentabilidade da construção*, Ecopy.
- Mazzoni, M., 2012. What Does “Close the Loop” Really Mean? - Earth911.com. Disponível em: <http://www.earth911.com/general/close-the-loop-primer/> [Consultado a 26 de Fevereiro, 2016].
- Michael Reynolds, 2017. *How to Build a Global Model Earthship - Operation I: Tire Work*, Disponível em: <https://earthshipstore.com/Earthship-books/es-global-model-op-1-tire-work> [Consultado a 4 de Janeiro, 2017].
- Morgan, L., 2002. Power of the People. , 1(October), pp.26–29.
- Mueller, F., 2015. RECYCLING to the Max. Disponível em: <http://eds.b.ebscohost.com/eds/pdfviewer/pdfviewer?sid=915628d8-bc1a-4caa-8827-d9d223406b46%2540sessionmgr120&vid=2&hid=120> [Consultado a 25 de Fevereiro, 2017].
- National Geographic, 2017. greenhouse effect - National Geographic Society. Disponível em: <http://www.nationalgeographic.org/encyclopedia/greenhouse-effect/> [Consultado a 12 de

-
- Fevereiro, 2017].
- Neiva, S., Mateus, R. & Bragança, L., 2012. UTILIZAÇÃO DO MÉTODO LCA NO PROJETO DE EDIFÍCIOS SUSTENTÁVEIS.
- OKflyboy, 2007. Pennock's Fiero Forum - More info about Earthships... (by OKflyboy). Disponível em: <http://www.fiero.nl/cgi-bin/fiero/showThread.cgi?forum=6&thread=052291&style=printable> [Consultado a 9 de Fevereiro, 2017].
- Oliveira Gonçalves de Almeida Machado, P. et al., 2010. Projecto de Estruturas de um Edifício Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Civil.
- Ordenes, M., Lamberts, R. & Güths, S., 2008. TRANSFERÊNCIA DE CALOR NA ENVOLVENTE DA EDIFICAÇÃO.
- outside table plans free, 2014. outside table plans free | Get free woodworking project plans for furniture, outside table plans free. Disponível em: <http://outdoorpatiotableplansfree.plansforbuildingshed.com/> [Consultado a 4 de Janeiro, 2017].
- P.da S. Shiraishi, B., L. dos Santos, J. & do Nascimento, P., 2017. *Pneus - reaproveitamento de pneus*, Disponível em: <http://www.ebah.pt/content/ABAAAAtFEAL/pneus> [Consultado a 4 de Janeiro, 2017].
- Pensamento Verde, 2013. O aquecimento global e as mudanças climáticas - Pensamento Verde. Disponível em: <http://www.pensamentoverde.com.br/meio-ambiente/o-aquecimento-global-e-as-mudancas-climaticas/> [Consultado a 1 de Março, 2017].
- REH- Portugal, 2013. Portugal, Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Habitação [Portuguese Thermal Regulation]. Disponível em: www.reh.pt. [Consultado a 4 de Janeiro, 2017]
- RGR- Portugal, 2007. *Regulamento Geral do Ruído*.
- RRAE- Portugal, 2002. RRAE | Regulamento dos Requisitos Acústicos dos Edifícios.
- Reynolds, M., 1990. Earthship__Vol.1_How to build your own.pdf. Disponível em: https://archive.org/details/eb_Earthship_Vol.1_How_to_build_your_own [Consultado a 4 de Janeiro, 2017].
- Reynolds, M., 1991. Earthship__Vol.2_Systems and components.pdf. Disponível em: https://archive.org/details/eb_Earthship_Vol.2_Systems_and_components [Consultado a 4 de Janeiro, 2017].
- Reynolds, M., 2009. Earthship__Vol.3_Evolution beyond economics.pdf. , p.272.
- SERREBROOKE, 2017. Earthship | Serrebrooke. Disponível em: <https://serrebrooke.wordpress.com/earthship/> [Consultado a 4 de Janeiro, 2017].

- SimaPro, 2017. About SimaPro. Disponível em: <http://www.simapro.co.uk/aboutsimapro.html> [Consultado a 1 de Março, 2017].
- Smith, A. & Seyfang, G., 2013. Constructing grassroots innovations for sustainability. *Global Environmental Change*, 23(5), pp.827–829.
- Soust-Verdaguer, B., Llatas, C. & García-Martínez, A., 2017. Critical review of bim-based LCA method to buildings. *Energy and Buildings*, 136, pp.110–120.
- The owner-builder network: The DIY Community, 2017. Earthship Homes | The Owner-Builder Network. Disponível em: <http://theownerbuildernetwork.co/house-hunting/sustainable-and-green-homes/earthship-homes/> [Consultado a 4 de Janeiro, 2017].
- United Nations, 2017. Sustainable Development Goals .:. Sustainable Development Knowledge Platform. Disponível em: <https://sustainabledevelopment.un.org/?menu=1300> [Consultado a 4 de Janeiro, 2017]].
- Vertex- Engenharia e Arquitetura, 2013. Poluição na Construção » Vertex. Disponível em: <http://www.vertexcorp.com.br/poluicao-na-construcao/> [Consultado a 1 de Março, 2017].

ANEXO I – MEDIDAS DA PLANTA DO EDIFÍCIO CASO DE ESTUDO

Repartição do edifício	Área (m ²)	Área total = Área de pavimento útil (Ap) (m ²)
<i>Zona de conforto</i>	104,56	164,62
<i>Zona verde</i>	60,06	

Dimensões dos elementos construtivos

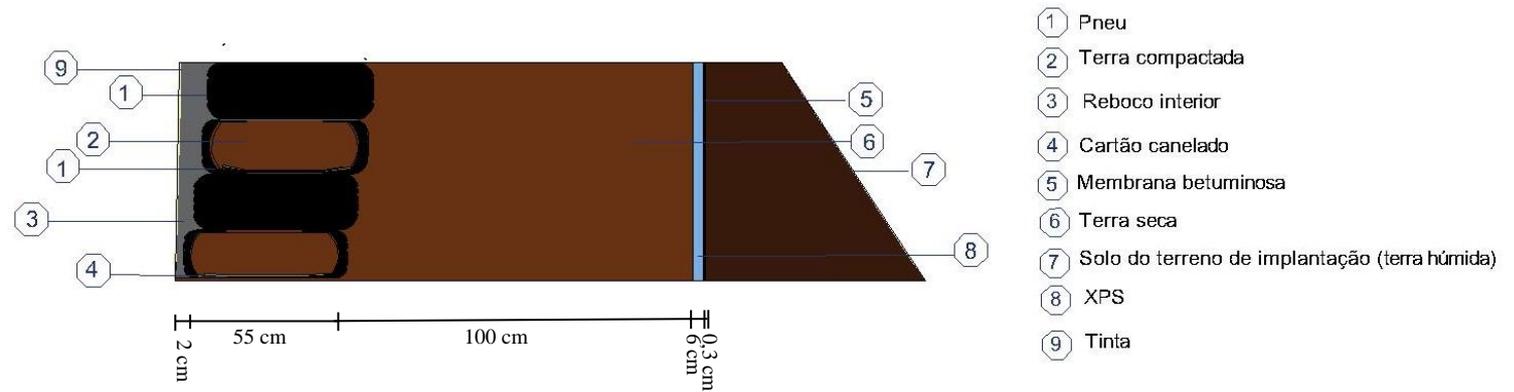
Elementos verticais		Designação do elemento construtivo	Área (m ²)	Comprimento (m)	Altura (m)	Área envidraçada (m ²)
<i>Paredes exteriores</i>	<i>Paredes enterradas</i>	<i>PE1</i>	57,915	21,45	2,70	-
		<i>PE2</i>	17,01	6,30	2,70	-
		<i>PE3</i>	2,70	1,00	2,70	-
	<i>Paredes que delimitam a zona verde</i>	<i>PE4</i>	0,33	1,65	0,20	4,46
		<i>PE5</i>	0,40	2,00	0,20	5,40
		<i>PE6</i>	1,39	6,95	0,20	18,77
		<i>PE7</i>	3,89	19,45	0,20	58,96
		<i>PE8</i>	0,22	1,10	0,20	2,97
		<i>PE9</i>	0,40	2,00	0,20	2,90
		<i>PE10</i>	0,20	1,00	0,20	5,20
		<i>PE11</i>	0,06	0,30	0,20	1,35
<i>Paredes interiores</i>	<i>Garrafas de vidro</i>	71,86	-	2,70	-	
	<i>Latas</i>	65,12	-	2,70	-	
Elementos horizontais		Designação do elemento construtivo	Área (m ²)	Perímetro exposto- P (m)		
<i>Cobertura</i>		<i>CE</i>	165	-		
<i>Pavimentos</i>	<i>Cerâmico</i>		13,54	2,25		
	<i>Madeira</i>		147,86	32,15		
	<i>Terra</i>		3,23	26,60		

Dimensões dos vãos envidraçados e vãos opacos

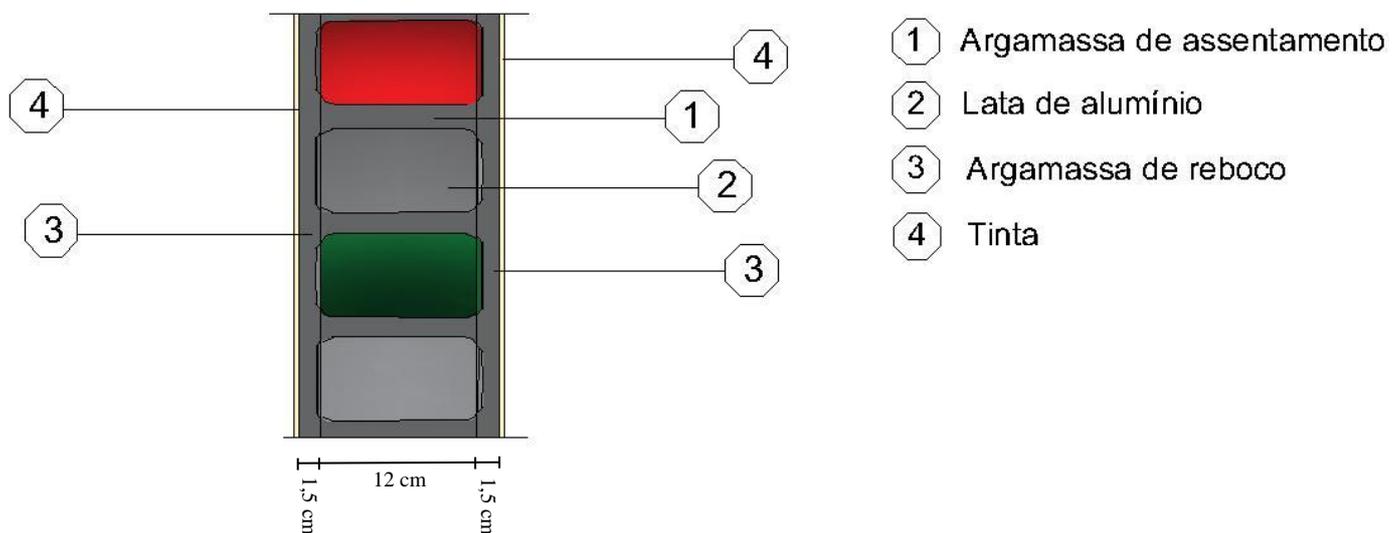
			Área (m ²)	Comprimento (m)	Altura (m)	Área total de envidraçado (m ²)	Área de vidro (m ²)	Área total de caixilharia (m ²)
<i>Envidraçados</i>	<i>Interiores</i>	<i>Env. Int. 1</i>	26,46	9,8	2,70	32,67	29,69	2,95
		<i>Env. Int. 2</i>	6,21	2,30	2,70			
	<i>Exteriores</i>	<i>Env. Ext. 1</i>	4,13	1,65	2,50	91,82	81,98	9,84
		<i>Env. Ext. 2</i>	5,00	2,00	2,50			
		<i>Env. Ext. 3</i>	17,38	6,95	2,50			
		<i>Env. Ext. 4</i>	55,07	19,45	2,83			
		<i>Env. Ext. 5</i>	2,75	1,10	2,50			
		<i>Env. Ext. 6</i>	2,50	1,00	2,50			
		<i>Env. Ext. 7</i>	5,00	2,00	2,50			
		<i>Env. Ext. 8</i>	1,29	1,20	2,50			

Tipos de portas	Altura (m)	Largura (m)	Área (m ²)	Área de portas interiores (m ²)	Área de portas exteriores (m ²)
<i>Portas tipo 1 (4 portas)</i>	2,10	0,90	1,89	10,71	1,89
<i>Portas tipo 2 (3 portas)</i>	2,10	0,80	1,68		

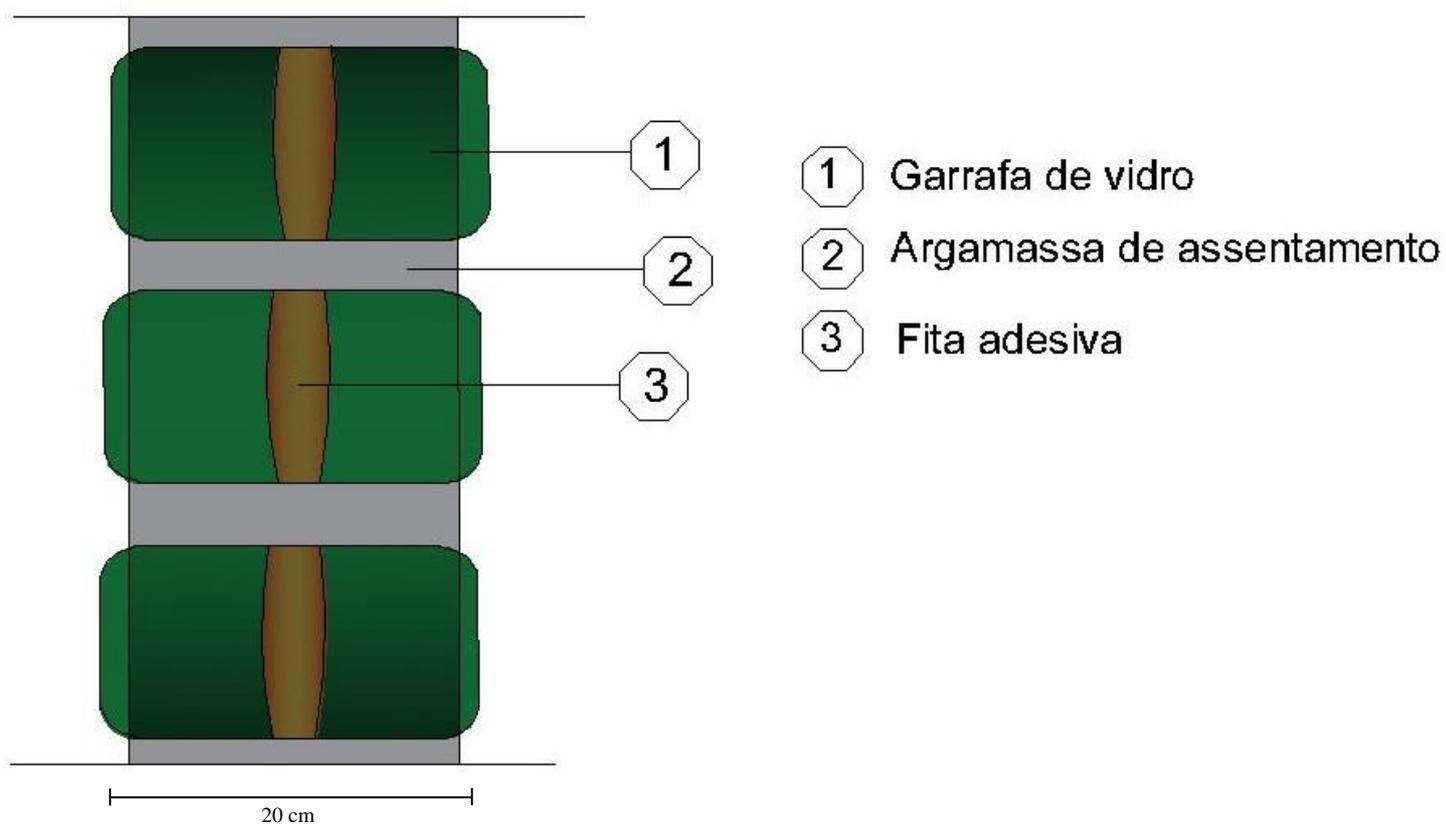
ANEXO II – REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DA PAREDE EXTERIOR EARTHSHIP



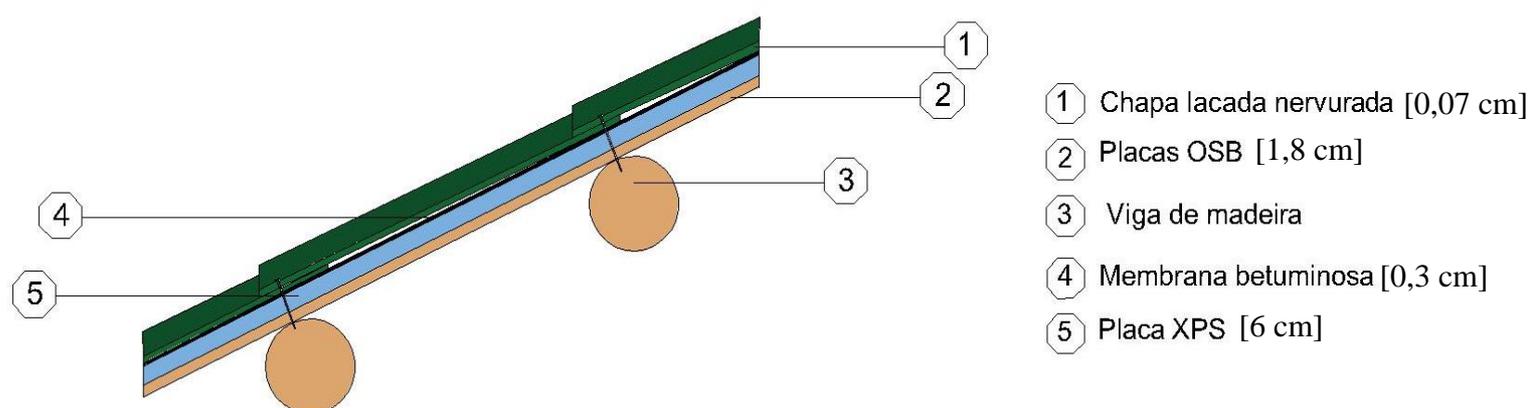
ANEXO III – REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DA PAREDE INTERIOR DE LATAS



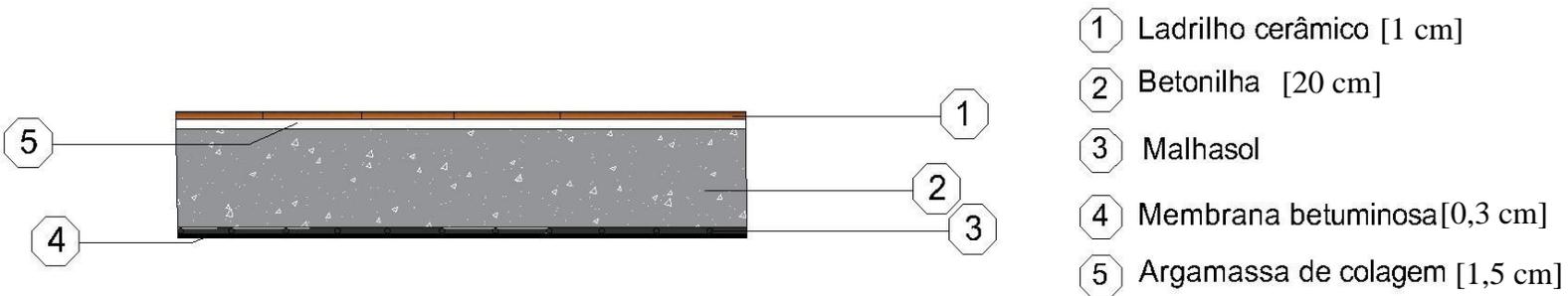
ANEXO IV – REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DA PAREDE INTERIOR DE GARRAFAS DE VIDRO



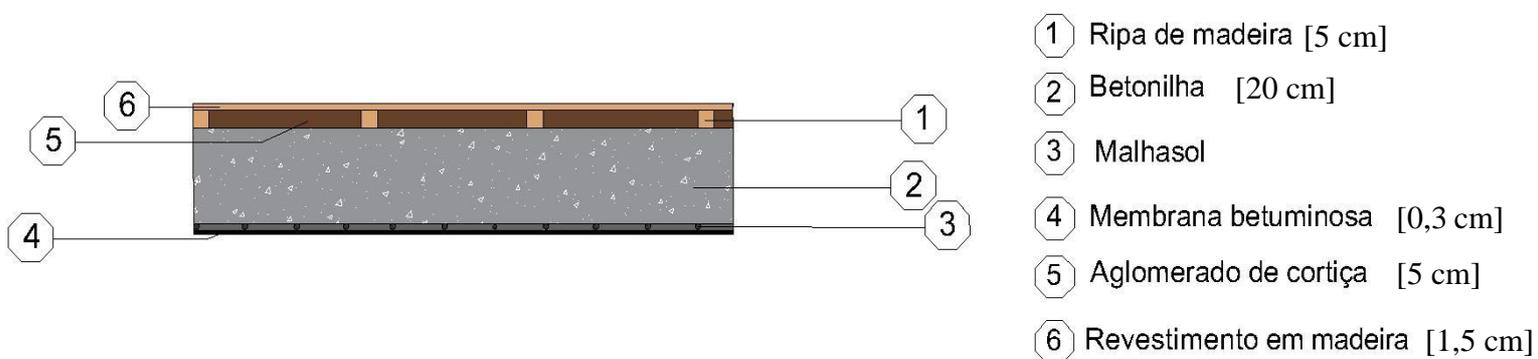
ANEXO V – REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DA COBERTURA EARTHSHIP



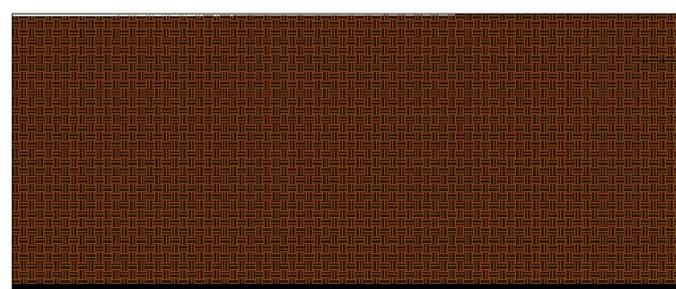
ANEXO VI – REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DO PAVIMENTO CERÂMICO



ANEXO VII – REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA O PAVIMENTO EM MADEIRA



ANEXO VIII – REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DO PAVIMENTO DAS CÉLULAS BOTÂNICAS



1

1 Terra vegetal [50 cm]

2 Membrana betuminosa [0,3 cm]

2

ANEXO IX – COEFICIENTE DE TRANSMISSÃO TÉRMICA E DADOS PARA O CÁLCULO DA INÉRCIA TÉRMICA DAS SOLUÇÕES EARTHSHIP

Solução construtiva paredes exteriores de pneus R13	e (mm)	e (m)	λ (W/m. °C)	Rt	ρ (Kg/m ³)	Kg/m ²	Rw	Msi	r	Si	Msi x r x Si
<i>Reboco interior</i>	20	0,02	1,3	0,02	1900	38	11,19	2869,17	1	77,63	11643,75
<i>Pneu</i>	10	0,01	0,65	0,02	1140	11,40					
<i>Terra compactada no interior do pneu</i>	524,2	0,52	0,16	3,28	1850	969,77					
<i>Camada de terra</i>	1000	1,00	0,16	6,25	1850	1850					
<i>XPS</i>	60	0,06	0,037	1,62	32,50	1,95					
<i>Membrana betuminosa</i>	3	0,003	0,23	0,01	1050	3,15					
U	0,204										
Solução construtiva para as paredes exteriores de pneus R14	e (mm)	e (m)	λ (W/m. °C)	Rt	ρ (Kg/m ³)	Kg/m ²	Rw	Msi	r	Si	Msi x r x Si
<i>Reboco interior</i>	20	0,02	1,3	0,02	1900	38	11,36	2968,01	1	77,63	11643,75
<i>Pneu</i>	10	0,01	0,65	0,02	1140	11,4					
<i>Terra compactada no interior do pneu</i>	550,6	0,55	0,16	3,44	1850	1018,61					
<i>Camada de terra</i>	1000	1	0,16	6,25	1900	1900					
<i>XPS</i>	60	0,06	0,04	1,62	32,50	1,95					
<i>Membrana betuminosa</i>	3	0,003	0,23	0,01	1050	3,15					
U	0,204										
Solução construtiva para paredes exteriores de pneus R15	e (mm)	e (m)	λ (W/m. °C)	Rt	ρ (Kg/m ³)	Kg/m ²	Rw	M si	r	Si	Msi x r x Si
<i>Reboco interior</i>	20	0,02	1,3	0,02	1900	38	11,52	2965	1	77,63	11643,75
<i>Pneu</i>	10	0,01	0,65	0,02	1140	11,40					
<i>Terra compactada interior do pneu</i>	576	0,58	0,16	3,60	1850	1065,60					
<i>Camada de terra</i>	1000	1	0,16	6,25	1850	1850					
<i>XPS</i>	60	0,06	0,04	1,62	32,50	1,95					
<i>Membrana betuminosa</i>	3	0,003	0,23	0,013	1050	3,15					
U	0,204										

Solução construtiva para paredes exteriores de pneus R16	e (mm)	e (m)	λ (W/m. $^{\circ}$ C)	Rt	ρ (Kg/m ³)	Kg/m ²	Rw	M si	r	Si	Msi x r x Si
<i>Reboco interior</i>	20	0,02	1,3	0,02	1900	38	11,67	3011,99	1	77,63	11643,75
<i>Pneu</i>	10	0,01	0,65	0,02	1140	11,40					
<i>Terra compactada interior do pneu</i>	601,40	0,60	0,16	3,76	1850	1112,59					
<i>Camada de terra</i>	1000	1	0,16	6,250	1850	1850					
<i>XPS</i>	60	0,06	0,04	1,622	32,50	1,95					
<i>Membrana betuminosa</i>	3	0,003	0,23	0,013	1050	3,15					
U	0,204										

Solução construtiva para paredes exteriores de pneus R15 como murete dos envidraçados	e (mm)	e (m)	λ (W/m. $^{\circ}$ C)	Rt	ρ (Kg/m ³)	Kg/m ²	M si	r	Si	Msi x r x Si	
<i>Reboco interior</i>	20	0,02	1,3	0,02	1900	38	1161,99	1	6,89	1033,50	
<i>Pneu</i>	10	0,01	0,65	0,02	1140	11,40					
<i>Terra compactada interior do pneu</i>	601,40	0,60	0,16	3,76	1850	1112,59					
<i>XPS</i>	60	0,06	0,04	1,62	32,50	1,95					
<i>Reboco exterior</i>	20	0,02	1,3	0,015	1900	38					
U	0,179										

Solução construtiva para a cobertura	e (mm)	e (m)	λ (W/m. $^{\circ}$ C)	Rt	ρ (Kg/m ³)	Kg/m ²	M si	r	Si	Msi x r x Si	
<i>Painel OSB</i>	18	0,02	0,13	0,14	630	11,34	11,34	1	164,62	1866,79	
<i>Placa XPS</i>	60	0,06	0,037	1,62	32,50	1,95					
<i>Membrana betuminosa</i>	3	0,003	0,23	0,01304	1050	3,15					
<i>Chapa lacada nervurada</i>	0,7	0,0007	110	6,36364E-06	7200	5,04					
U	0,523										

Solução construtiva para o pavimento térreo em cerâmica	e (mm)	e (m)	λ (W/m. °C)	Rt	ρ (Kg/m ³)	Kg/m ²	Rf	M si	r	Si	Msi x r x Si
<i>Membrana betuminosa</i>	3	0,003	0,23	0,013	1050	3,15	0,15	532,65	1	13,54	2030,25
<i>Betonilha</i>	200	0,2	2	0,1	2450	490					
<i>Argamassa de assentamento</i>	15	0,02	1,3	0,01	1900	28,50					
<i>Ladrilho cerâmico</i>	10	0,01	0,41	0,02	1100	11					
U	0,615										
Solução construtiva para o pavimento térreo em madeira	e (mm)	e (m)	λ (W/m. °C)	Rt	ρ (Kg/m ³)	Kg/m ²	Rf	M si	r	Si	Msi x r x Si
<i>Membrana betuminosa</i>	3	0,003	0,23	0,01	1050	3,15	1,18	514,80	1	147,86	22178,25
<i>Betonilha</i>	200	0,2	2	0,1	2450	490					
<i>Aglomerado de cortiça</i>	50	0,05	0,05	1	190	9,5					
<i>Madeira</i>	15	0,02	0,23	0,07	810	12,15					
U	0,325										
Solução construtiva para o pavimento térreo do canteiro	e (mm)	e (m)	λ (W/m. °C)	Rt	ρ (Kg/m ³)	Kg/m ²	Rf	M si	r	Si	Msi x r x Si
<i>Membrana betuminosa</i>	3	0,003	0,23	0,01	1050	3,15	0,64	728,15	1	3,23	484,50
<i>Terra preta</i>	500	0,50	0,80	0,63	1450	725					
U	0,416										

Solução construtiva paredes divisórias de latas	e (mm)	e (m)	λ (W/m. °C)	Rt	ρ (Kg/m ³)	Kg/m ²	M si	r	Si	Msi x r x Si
<i>Reboco interior</i>	15	0,02	0,30	0,05	-	38	78,25	1	144,61	43383,72
<i>Latas de alumínio</i>	115	0,12	230	0,001	-	2,25				
<i>Reboco interior</i>	15	0,02	0,04	0,38	-	38				
Solução construtiva para as paredes divisórias de vidro	e (mm)	e (m)	λ (W/m. °C)	Rt	ρ	Kg/m ²	M si	r	Si	Somatório
<i>Garrafa de vidro</i>	20	0,02	1,3	0,02	2500	6	6	1	131,14	786,81

ANEXO X – COEFICIENTE DE TRANSMISSÃO TÉRMICA E DADOS PARA O CÁLCULO DA INÉRCIA TÉRMICA DAS SOLUÇÕES CONVENCIONAIS

Solução construtiva convencional para paredes exteriores	e (mm)	e (m)	λ (W/m.°C)	Rt	ρ (Kg/m ³)	Kg/m ²	R se	R si	M si	r	Si	Msi x r x Si
<i>Gesso projetado</i>	15	0,02	0,25	0,06	607	9,11	0,04	0,13	148,37	1	84,52	12539,07
<i>Tijolo 22</i>	220	0,22	-	0,52	633	139,26						
<i>EPS</i>	60	0,06	0,045	1,33	12	0,72						
<i>Reboco exterior</i>	10	0,01	1,3	0,01	1900	19						
U	0,478											
Solução construtiva convencional para paredes interiores	e (mm)	e (m)	λ (W/m.°C)	Rt	ρ (Kg/m ³)	Kg/m ²	R se	R si	M si	r	Si	Msi x r x Si
<i>Gesso projetado</i>	15	0,02	0,25	0,06	607	9,1	-	-	95,58	1	275,75	26354,56
<i>Tijolo 11</i>	110	0,11	-	0,27	630	69,30						
<i>Lã de rocha</i>	60	0,06	0,04	1,50	67,50	4,05						
<i>Placa gesso cartonado</i>	15	0,02	0,25	0,06	875	13,13						

Solução construtiva convencional para cobertura	e (mm)	e (m)	λ (W/m.°C)	Rt	ρ (Kg/m ³)	Kg/m ²	R se	R si	M si	r	Si	Msi x r x Si
<i>Placa de gesso cartonado</i>	15	0,02	0,25	0,06	875	13,13	0,04	0,1	13,13	1	100,95	1324,97
<i>Placa XPS</i>	60	0,06	0,04	1,62	32,50	1,95						
<i>Tela anti vapor</i>	3	0,003	0,23	0,01	1050	3,15						
<i>Telha cerâmica</i>	10	0,01	0,41	0,02	1100	11						
U	0,537907601											

Vãos	U
<i>Envidraçados (vidro duplo e caixilharia em madeira)</i>	2,80
<i>Opacos- Portas</i>	2,31

Nota: As soluções construtivas para pavimentos encontram-se no Anexo IX. Os *U*'s para vãos envidraçados e opacos são os mesmos para o edifício *Earthship*.

ANEXO XI – QUANTIDADES DE MATERIAL DO EDIFÍCIO EARTHSHIP

Elemento construtivo		Material	Quantidade	Unidade
<i>Cobertura</i>		<i>Chapa de zinco</i>	594,00	kg
		<i>Membrana betuminosa</i>	520,00	Kg
		<i>XPS</i>	322,00	Kg
		<i>Placas OSB</i>	1 870,00	Kg
<i>Pavimentos</i>	<i>Cerâmico</i>	<i>Revestimento cerâmico</i>	149,00	Kg
		<i>Argamassa de colagem</i>	386,00	Kg
		<i>Betonilha</i>	65,00	Kg
		<i>Rede eletrosoldada</i>	10,00	Kg
		<i>Membrana betuminosa</i>	42,60	Kg
	<i>Madeira</i>	<i>Revestimento em madeira</i>	1 800,00	Kg
		<i>Ripas de madeira</i>	458,00	Kg
		<i>Aglomerado de cortiça</i>	1 400,00	Kg
		<i>Betonilha</i>	710,00	Kg
		<i>Rede eletrosoldada</i>	109,00	Kg
	<i>Canteiro</i>	<i>Membrana betuminosa</i>	466,00	Kg
		<i>Terra preta</i>	3,23	m ³
<i>Paredes exteriores</i>	<i>Parede exterior</i>	<i>Membrana betuminosa</i>	10,20	Kg
		<i>Terra preta</i>	49,93	m ³
		<i>Membrana betuminosa</i>	293,00	Kg
		<i>XPS</i>	181,00	Kg
		<i>Terra seca (1m)</i>	66,79	m ³
		<i>Pneus</i>	5 588,28	Kg
		<i>Terra seca (interior dos pneus)</i>	3 833,76	m ³
		<i>Argamassa de reboco (interior)</i>	2 950,00	Kg
	<i>Parede exterior de murete</i>	<i>Tinta (interior)</i>	54,30	Kg
		<i>Tinta (interior + exterior)</i>	9,65	Kg
		<i>Argamassa de reboco (interior + exterior)</i>	524,00	Kg
		<i>Pneus</i>	1 313,41	Kg
		<i>XPS</i>	13,40	Kg
		<i>Terra seca (interior dos pneus)</i>	788,01	m ³
		<i>Tinta (2 faces)</i>	101,00	Kg
<i>Paredes interiores</i>	<i>Latas</i>	<i>Argamassa de reboco (2 faces)</i>	4 120,00	Kg

		<i>Argamassa de assentamento</i>	145,00	Kg
		<i>Latas</i>	161,88	Kg
	<i>Garrafas de vidro</i>	<i>Garrafas</i>	390,71	Kg
		<i>Argamassa de assentamento</i>	746,00	Kg
<i>Envidraçados</i>	<i>Interior</i>	<i>Caixilho de madeira</i>	2,98	m ²
		<i>Vidro simples</i>	29,69	m ²
			742,13	Kg
	<i>Exterior</i>	<i>Caixilho de madeira</i>	9,84	m ²
<i>Vidro duplo</i>		81,98	m ²	
<i>Vãos opacos</i>		<i>Portas interiores</i>	10,71	m ²
		<i>Portas exteriores</i>	1,89	m ²
<i>Estrutura</i>		<i>Vigas em madeira</i>	6,43	m ³
		<i>Aço de reforço</i>	7,21	Kg

ANEXO XII – QUANTIDADES DE MATERIAL DO EDIFÍCIO CONVENCIONAL

Elemento construtivo		Material	Quantidade	Unidade
<i>Cobertura</i>		<i>Telha cerâmica</i>	1 820,00	kg
		<i>Membrana betuminosa</i>	520,00	kg
		<i>XPS</i>	322,00	kg
		<i>Gesso cartonado</i>	2 160,00	kg
<i>Pavimentos</i>	<i>Cerâmico</i>	<i>Revestimento cerâmico</i>	149,00	kg
		<i>Argamassa de colagem</i>	386,00	kg
		<i>Betonilha</i>	65,00	kg
		<i>Rede eletrosoldada</i>	10,00	kg
		<i>Membrana betuminosa</i>	42,60	kg
	<i>Madeira</i>	<i>Revestimento em madeira</i>	1 800,00	kg
		<i>Ripas de madeira</i>	458,00	kg
		<i>Aglomerado de cortiça</i>	1 400,00	kg
		<i>Betonilha</i>	710,00	kg
		<i>Rede eletrosoldada</i>	109,00	kg
		<i>Membrana betuminosa</i>	466,00	kg
	<i>Canteiro</i>	<i>Terra preta</i>	3,23	m ³
		<i>Membrana betuminosa</i>	10,20	kg
<i>Parede exterior</i>		<i>Tinta (interior+ exterior)</i>	118,00	kg
		<i>Argamassa de reboco exterior</i>	3 210,00	kg
		<i>EPS</i>	60,90	kg
		<i>Argamassa de assentamento</i>	2 770,00	kg
		<i>Tijolo 22</i>	1 280,00	kg
		<i>Gesso projetado</i>	770,00	kg
		<i>Parede interior</i>		<i>Tinta (2 faces)</i>
<i>Gesso cartonado</i>	1 800,00			kg
<i>Lã de rocha</i>	555,00			kg
<i>Tijolo 11</i>	8 210,00			kg
<i>Argamassa de assentamento</i>	2 240,00			kg
<i>Gesso projetado</i>	1 250,00			kg
<i>Envidraçados</i>	<i>Interior</i>			<i>Caixilho de madeira</i>
		<i>Vidro simples</i>	29,69	m ²
			742,13	kg

	<i>Exterior</i>	<i>Caixilho de madeira</i>	9,84	m ²
		<i>Vidro duplo</i>	81,98	m ²
<i>Vãos opacos</i>		<i>Portas interiores</i>	10,71	m ²
		<i>Portas exteriores</i>	1,89	m ²
<i>Estrutura</i>		<i>Betão das vigas e pilares</i>	8,81	m ³
		<i>Aço das vigas e pilares</i>	883,31	kg
		<i>Betão das sapatas</i>	8,40	m ³
		<i>Aço das sapatas</i>	61,70	kg

ANEXO XIII – IMPACTE AMBIENTAL DAS SOLUÇÕES CONSTRUTIVAS EARTHSHIP

Elementos		CML Baseline 2000						Cumulative Energy Demand	
		ADP	AP	EP	GWP	ODP	POCP	ENR	ER
		kg Sb eq	kg SO2 eq	kg PO4 eq	kg CO2 eq	kg CFC-11 eq	kg C2H4 eq	MJ eq	MJ eq
Paredes exteriores	Parede exterior pneus	0,00488	24,9	7,04	4,24E+03	0,000618	1,15	74963	3108
	Parede exterior murete	0,000593	4,18	1,16	665	9,32E-05	0,159	9689,7	427,1
Paredes interiores	Parede de latas	0,00395	8,85	3,46	1,90E+03	0,000192	0,556	20987	3492,6
	Parede de garrafas de vidro	0,000127	0,52	0,195	175	1,21E-05	0,023	1445,113	198,39
Pavimentos	Cerâmico	0,00934	4,59	1,42	679	9,29E-05	0,327	12410,39	744,9
	Madeira	0,0102	21,9	8,93	3,80E+03	0,000579	1,76	76096,7	223725
	Canteiro	5,37E-05	0,0797	0,0176	13,5	4,68E-06	0,00456	523,3159	19,623
Cobertura		4,58	50,9	19,4	5,78E+03	0,000712	2,5	104613	40608
Envidraçados	Exteriores	0,0748	37,2	11,6	4,58E+03	5,11E-04	1,86	61562	38023
	Interiores	0,0214	10,2	3,03	1,26E+03	0,00014	0,487	17070,8	11212,3
Vãos opacos	Portas	0,0274	5,76	6,03	817	7,83E-05	0,366	11921,9	14808,2
Estrutura		0,00196	1,64	3,74	3,43E+02	6,24E-05	0,437	6245,4	120294,9
Sistemas		7,29E+04	5,47E+01	2,90E+01	6,19E+03	1,10E-03	2,91E+00	82725,6	13433
Soma total sem sistemas		4,7347	1,71E+02	6,60E+01	2,43E+04	3,10E-03	9,63E+00	397528,32	456662,013
Soma total com sistemas		72904,73	225,4197	95,0226	3,04E+04	0,0042	12,53956	480253,92	470095,01
Peso (W)		0	0,119	0,119	0,381	0,119	0,1429	0,119	0
Impacte ambiental com sistemas		0,50							
Impacte ambiental sem sistemas		0,52							

ANEXO XIV – IMPACTE AMBIENTAL DAS SOLUÇÕES CONSTRUTIVAS CONVENCIONAIS

Elementos	CML Baseline 2000						Cumulative Energy Demand		
	<i>ADP</i>	<i>AP</i>	<i>EP</i>	<i>GWP</i>	<i>ODP</i>	<i>POCP</i>	<i>ENR</i>	<i>ER</i>	
	kg Sb eq	kg SO ₂ eq	kg PO ₄ eq	kg CO ₂ eq	kg CFC-11 eq	kg C ₂ H ₄ eq	MJ eq	MJ eq	
<i>Parede exterior</i>	0,00454	11,8	4,51	2 740	0,000231	1,06	32 296	4 578,6	
<i>Parede interior</i>	0,0111	25,7	9,36	5 080	0,000588	1,6	65 174	9 444	
<i>Pavimentos</i>	<i>Cerâmico</i>	0,00934	4,59	1,42	679	0,0000929	0,327	12 410,39	744,90
	<i>Madeira</i>	0,0102	21,9	8,930	3 800	0,000579	1,76	76 096,7	223 725
	<i>Canteiro</i>	0,0000537	0,0797	0,0176	13,50	0,0000047	0,00456	523,3159	19,623
<i>Cobertura</i>	0,00622	13,4	4,60	3 120	0,000477	1,030	74 954,55	5 235	
<i>Envidraçados</i>	<i>Exteriores</i>	0,0748	37,2	11,6	4 580	0,000511	1,860	61 562	38 023
	<i>Interiores</i>	0,0214	10,2	3,03	1 260	0,00014	0,487	17 070,8	11 212,3
<i>Vãos opacos</i>	<i>Portas</i>	0,0274	5,76	6,03	817	0,0000783	0,366	11 921,9	14 808,2
<i>Estrutura</i>	0,0133	18,6	7,06	6 200	0,000322	1,54	44 981,3	2 647	
<i>Sistemas</i>	0,202	40,2	25,8	6 540	0,0965	1,99	36 605,53	3 732	
<i>TOTAL sem sistemas</i>	0,17835	149,2297	56,5576	28 289,5	0,0030239	10,03456	396 990,9559	310 437,623	
<i>TOTAL com sistemas</i>	0,38035	189,4297	82,3576	34 829,5	0,0995239	12,02456	433 596,4859	314 169,623	
<i>Peso (W)</i>	-	0,119	0,119	0,381	0,119	0,1429	0,119	-	
Impacte ambiental com sistemas	0,50								
Impacte ambiental sem sistemas	0,48								

ANEXO XV – EMISSÃO DE CO₂ AO LONGO DO CICLO DE VIDA DOS EDIFÍCIOS (DADOS PARA A DETERMINAÇÃO DO TEMPO DE RETORNO)

Convencional		Earthship		Convencional		Earthship	
Ano	GWP (kg CO ₂ eq)	GWP (kg CO ₂ eq)	Ano	GWP (kg CO ₂ eq)	GWP (kg CO ₂ eq)	Ano	GWP (kg CO ₂ eq)
0	34829,5	30400	26	243250,96	213586,38		
1	42845,71	37445,63	27	251267,17	220632,01		
2	50861,92	44491,26	28	259283,38	227677,64		
3	58878,13	51536,89	29	267299,59	234723,27		
4	66894,34	58582,52	30	275315,8	241768,9		
5	74910,55	65628,15	31	283332,01	248814,53		
6	82926,76	72673,78	32	291348,22	255860,16		
7	90942,97	79719,41	33	299364,43	262905,79		
8	98959,18	86765,04	34	307380,64	269951,42		
9	106975,39	93810,67	35	315396,85	276997,05		
10	114991,6	100856,3	36	323413,06	284042,68		
11	123007,81	107901,93	37	331429,27	291088,31		
12	131024,02	114947,56	38	339445,48	298133,94		
13	139040,23	121993,19	39	347461,69	305179,57		
14	147056,44	129038,82	40	355477,9	312225,2		
15	155072,65	136084,45	41	363494,11	319270,83		
16	163088,86	143130,08	42	371510,32	326316,46		
17	171105,07	150175,71	43	379526,53	333362,09		
18	179121,28	157221,34	44	387542,74	340407,72		
19	187137,49	164266,97	45	395558,95	347453,35		
20	195153,7	171312,6	46	403575,16	354498,98		
21	203169,91	178358,23	47	411591,37	361544,61		
22	211186,12	185403,86	48	419607,58	368590,24		
23	219202,33	192449,49	49	427623,79	375635,87		
24	227218,54	199495,12	50	435640	382681,50		
25	235234,75	206540,75					

ANEXO XVI – DESEMPENHO ECONÓMICO DO EDIFÍCIO EARTHSHIP

Elemento construtivo		Material	Preço	Unidade	Quantidades	Preço total em EUR
Cobertura		Chapa zinco + pregagens aos barrote e mão de obra	18,40	EUR/m ²	165	3036
		Membrana betuminosa	24,85	EUR/m ²	165	4100,25
		XPS	9,92	EUR/m ²	165	1636,8
		Placas OSB	27,06	EUR/m ²	164,62	4454,6172
Pavimentos	Cerâmico	Membrana betuminosa	20,72	EUR/m ²	13,535	280,4452
		Revestimento cerâmico (com cimento cola)	28,35	EUR/m ²	13,535	383,701008
		Massame de betão	27,17	EUR/m ²	147,855	4017,146423
	Madeira	Revestimento em madeira	73,94	EUR/m ²	147,855	10931,88121
		Ripas de madeira + fixação	12,38	EUR/m ²	147,855	1829,705625
		Membrana betuminosa	20,72	EUR/m ²	147,855	3063,5556
		Aglomerado de cortiça	14,91	EUR/m ²	147,855	2204,591978
	Canteiro	Massame de betão	27,17	EUR/m ²	147,855	4017,146423
		Terra preta	-	EUR/m ²	3,23	0
		Escavação da vala	22,50	EUR/m ³	2,261	50,8725
		Membrana betuminosa	16,92	EUR/m ²	3,23	54,6516
Paredes exteriores	Parede exterior	Terra preta	-	EUR/m ³	49,9265	0
		Membrana betuminosa	11,52	EUR/m ²	30,75	354,24
		Membrana betuminosa da fundação	13,72	EUR/m ²	7,0725	97,0347
		XPS	10,69	EUR/m ²	30,75	328,7175
		Terra seca (1m)	-	EUR/m ³	66,7888	0
		Pneus	-	EUR/m ²	76,746	0
		Terra seca (interior dos pneus)	-	EUR/m ³	3833,76	0
		Argamassa de reboco (interior)	11,25	EUR/m ²	77,625	873,28125
		Tinta (interior)	3,85	EUR/m ²	77,625	298,85625
		Aterro da terra preta+ a seca	9,05	EUR/m ²	2000,2009	18101,81815
	Parede exterior de murete	Abertura das valas de fundação	22,50	EUR/m ³	7,0725	159,13125
		Tinta (interior + exterior)	3,85	EUR/m ²	13,78	53,053
		Argamassa de reboco (interior + exterior)	11,25	EUR/m ²	13,78	155,025
		Pneus	-	EUR/m ²	6,89	0
		XPS	9,92	EUR/m ²	6,89	68,3437014
		Abertura das valas de fundação	22,54	EUR/m ³	14,1245	318,36623
		Membrana betuminosa da fundação	13,72	EUR/m ²	14,1245	193,78814
Paredes interiores	Latas	Terra seca (interior dos pneus)	-	EUR/m ³	788,012	0
		Tinta (2 faces)	3,85	EUR/m ²	144,6124	556,75774
		Argamassa de reboco (2 faces)	11,25	EUR/m ²	144,6124	1626,8895

		<i>Argamassa de assentamento</i>	9,29	EUR/m ²	71,856	667,54224
		<i>Latas</i>	-	EUR/m ²	71,856	0
	<i>Garrafas de vidro</i>	<i>Garrafas</i>	-	EUR/m ²	65,1175	0
		<i>Argamassa de assentamento</i>	9,29	EUR/m ²	65,1175	604,9930178
<i>Envidraçados</i>	<i>Interior</i>	<i>Caixilho de madeira</i>	216,11	EUR/m ²	2,9848	645,045128
		<i>Vidro simples</i>	31,77	EUR/m ²	29,6852	943,098804
	<i>Exterior</i>	<i>Caixilho de madeira</i>	81,98	EUR/m ²	9,83927	806,6430331
		<i>Vidro duplo</i>	67,48	EUR/m ²	81,9820435	5532,148295
<i>Vãos opacos</i>	<i>Portas interiores</i>		157,81	EUR/un	6	946,86
	<i>Portas exteriores</i>		283,13	EUR/un	1	283,13
<i>Estrutura</i>	<i>Vigas em madeira</i>		118,03	EUR/m ³	6,4277	758,6807141
	<i>Aço de reforço</i>		0,87	EUR/kg	7,209	6,27183
					CC= 74441,08023 €	
					I_E= 0	

ANEXO XVII – DESEMPENHO ECONÓMICO DO EDIFÍCIO CONVENCIONAL

Elemento construtivo		Material	Preço de construção	Unidade	Quantidade	Preço total em EUR	
<i>Cobertura</i>		<i>Telha cerâmica (com colocação)</i>	19,78	EUR/m ²	165	3 263,70	
		<i>Membrana betuminosa</i>	24,85	EUR/m ²	165	4 100,25	
		<i>XPS</i>	9,92	EUR/m ²	165	1 636,80	
		<i>Gesso cartonado</i>	19,31	EUR/m ²	164,62	3 178,81	
<i>Pavimentos</i>	<i>Cerâmico</i>	<i>Revestimento cerâmico (com cimento cola)</i>	28,35	EUR/m ²	13,535	383,70	
		<i>Massame de betão</i>	27,17	EUR/m ²	13,535	367,74	
		<i>Membrana betuminosa</i>	20,72	EUR/m ²	13,535	280,45	
	<i>Madeira</i>	<i>Revestimento em madeira</i>	73,94	EUR/m ²	147,855	10 931,88	
		<i>Ripas de madeira + fixação</i>	12,38	EUR/m ²	147,855	1 829,71	
		<i>Aglomerado de cortiça</i>	14,91	EUR/m ²	147,855	2 204,59	
		<i>Massame de betão</i>	27,27	EUR/m ²	147,855	4 031,93	
		<i>Membrana betuminosa</i>	20,72	EUR/m ²	147,855	3 063,56	
		<i>Canteiro</i>	<i>Terra preta</i>	-	EUR/m ²	3,23	-
	<i>Escavação da vala</i>		22,50	EUR/m ³	2,261	50,87	
	<i>Membrana betuminosa</i>		16,92	EUR/m ²	3,23	54,65	
	<i>Parede exterior</i>		<i>Tinta (exterior)</i>	3,85	EUR/m ²	84,515	325,38
			<i>Argamassa de reboco exterior</i>	35,53	EUR/m ²	84,515	3 002,82
<i>EPS</i>			9,76	EUR/m ²	84,515	824,87	
<i>Tijolo 22 com argamassa de assentamento</i>			20,22	EUR/m ²	84,515	1 708,89	
<i>Gesso projetado</i>			8,28	EUR/m ²	84,515	699,78	
<i>Tinta (interior)</i>			4,91	EUR/m ²	84,515	414,97	
<i>Parede interior</i>			<i>Tinta (2 faces)</i>	4,91	EUR/m ²	275,7474	1 353,92
		<i>Gesso cartonado com estrutura autoportante</i>	24,52	EUR/m ²	136,9737	3 358,60	

		<i>Lã de rocha</i>	14,71	EUR/m ²	136,9737	2 014,88
		<i>Tijolo 11 com argamassa de assentamento</i>	11,15	EUR/m ²	136,9737	1 527,26
		<i>Gesso projetado</i>	8,28	EUR/m ²	136,9737	1 134,14
<i>Envidraçados</i>	<i>Interior</i>	<i>Caixilho de madeira</i>	216,11	EUR/m ²	2,9848	645,05
		<i>Vidro simples</i>	31,77	EUR/m ²	29,6852	943,10
	<i>Exterior</i>	<i>Caixilho de madeira</i>	216,11	EUR/m ²	9,83927	2 126,36
		<i>Vidro duplo</i>	67,48	EUR/m ²	81,9820435	5 532,15
<i>Vãos opacos</i>	<i>Portas interiores</i>		157,81	EUR/un	6	946,86
	<i>Portas exteriores</i>		283,13	EUR/un	1	283,13
<i>Estrutura</i>	<i>Sapatas</i>	<i>Abertura de valas de fundação</i>	22,50	EUR/m ³	4,8	108,00
		<i>Aço</i>	0,87	EUR/kg	61,7	53,68
		<i>Cofragem</i>	15,48	EUR/m ²	40	619,20
		<i>Membrana betuminosa</i>	13,72	EUR/m ²	16,96	232,69
		<i>Betão</i>	97,52	EUR/m ³	4,8	468,10
	<i>Pilares de betão armado (inclui cofragem)</i>		568,24	EUR/m ³	2,7	1 534,25
	<i>Vigas de betão armado (inclui cofragem)</i>		362,72	EUR/m ³	8,814	3 197,01
					CC= 68 433,72 €	
					IE= 1,00	