



Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Avaliação do Ciclo de Vida de um Sistema Construtivo em
Alvenaria Estrutural

Hélder Rafael Teixeira Cardoso

UMinho | 2015

Hélder Rafael Teixeira Cardoso

Avaliação do Ciclo de Vida de um Sistema
Construtivo em Alvenaria Estrutural

Junho de 2015



Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Hélder Rafael Teixeira Cardoso

Avaliação do Ciclo de Vida de um Sistema Construtivo em Alvenaria Estrutural

Tese de Mestrado
Mestrado em Sustentabilidade do Ambiente Construído

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

e coorientação da
**Professora Doutora Graça de Fátima Moreira de
Vasconcelos**

Junho de 2015

DECLARAÇÃO

Nome: Hélder Rafael Teixeira Cardoso

Endereço eletrónico: hrtc1990@hotmail.com

Número do Bilhete de Identidade: 13813682

Título da dissertação de mestrado:

Avaliação do Ciclo de Vida de um Sistema Construtivo em Alvenaria Estrutural

Orientadores:

Professor Doutor Ricardo Filipe Mesquita da Silva Mateus e Professora Doutora Graça de Fátima Moreira de Vasconcelos

Ano de conclusão: 2015

Designação do Mestrado:

Mestrado em Sustentabilidade do Ambiente Construído

É AUTORIZADA A REPRODUÇÃO INTEGRAL DESTA TESE APENAS PARA EFEITOS DE INVESTIGAÇÃO, MEDIANTE DECLARAÇÃO ESCRITA DO INTERESSADO, QUE A TAL SE COMPROMETE.

Universidade do Minho, ___/___/_____

Assinatura: _____

AGRADECIMENTOS

Apesar de se tratar de um trabalho individual, sem o contributo de várias pessoas teria sido muito mais difícil alcançar os objetivos a que me propus. Mesmo sendo inviável nomear todos, há algumas pessoas a quem não posso deixar de manifestar o meu apreço e gratidão pelo contributo que tiveram ao longo desta etapa tão importante na minha formação pessoal e profissional.

Desde logo e de forma especial ao Professor Ricardo Mateus e à Professora Graça Vasconcelos, orientador e coorientadora, pela sua disponibilidade, apoio, motivação e exigência constantes ao longo do trabalho.

Ao Professor Luís Bragança pelo apoio demonstrado durante estes dois anos que passei na Universidade do Minho.

Ao Professor João Gouveia pela disponibilização de informações relativas ao trabalho.

Dedico este trabalho aos meus Pais, ao André e à Ana, pessoas essenciais para que consiga alcançar este marco importante na minha formação. Estou eternamente grato pelo amor, carinho, compreensão e acompanhamento em todas as etapas da minha vida.

Por último uma palavra de apreço a todos os Professores, colegas e amigos pela partilha do seu conhecimento e pelo bom ambiente que me proporcionaram.

RESUMO

A indústria da construção é uma das atividades económicas mais importantes em Portugal, tendo um contributo negativo sobre o meio ambiente, assim como a nível social. Apesar da evolução constante ao nível dos materiais, a construção ainda continua dependente de métodos construtivos tradicionais, caracterizados pela grande exploração de recursos naturais e energéticos, tal como de mão de obra não qualificada, havendo uma forte resistência à introdução de novas tecnologias.

Este trabalho de investigação foca-se na avaliação da sustentabilidade do sistema construtivo em alvenaria estrutural “Alvest”. Para o efeito foi utilizada a Metodologia de Avaliação Relativa de Sustentabilidade de Soluções Construtivas (MARS-SC), que permite a avaliação e comparação, de forma quantitativa e gráfica, da sustentabilidade de uma solução construtiva relativamente à solução convencional.

Posteriormente foi avaliado o ciclo de vida de dois edifícios unifamiliares, um convencional e outro que utiliza o sistema construtivo em alvenaria estrutural, por forma a analisar e comparar o seu desempenho durante as várias fases da vida útil nas três dimensões de sustentabilidade – Ambiental, Funcional e Económica.

Este estudo permitiu concluir que a alvenaria estrutural acarreta vantagens relativamente ao sistema tradicional, proporcionando maior conforto térmico, tendo menores custos de ciclo de vida e originando menores impactes sobre o meio ambiente.

A aplicação deste método construtivo pode alterar o paradigma da construção, e como consequência potenciar o desenvolvimento de edifícios cada vez mais sustentáveis.

Palavras-chave: Soluções Construtivas, Alvenaria Estrutural, Construção Sustentável, Avaliação do Ciclo de Vida.

ABSTRACT

The construction industry is one of the most important economic activities in Portugal, with an important impact at social and economic level and with a negative contribution to the environment. Despite the constant evolution of construction materials, this industry is still dependent on traditional construction methods, characterised by a large exploitation of energy and resources, as well as unskilled labour force, which causes a strong resistance to the introduction of new technologies.

This investigation focuses on the sustainable evaluation of the constructive solution in structural masonry “Alvest”. To this effect, the MARS-SC (Metodologia de Avaliação Relativa de Sustentabilidade de Soluções Construtivas), which allows the evaluation and comparison, in a quantitative and graphical way, of the sustainability of a solution relatively to the conventional one.

The life cycle assessment of two housing buildings, one conventional and another one which uses the constructive system in structural masonry, developed on the analysis and comparison of their performances during the several phases of their useful life, considering the three sustainability dimensions – Environmental, Functional and Economical.

This study showed that the structural masonry entails advantages over the traditional system, providing greater thermal comfort and lower life-cycle costs, and causing lower impact on the environment.

Applying this construction method can change the construction’s paradigm and consequently boost the development of many sustainable buildings.

Key-words: Constructive solutions, Structural masonry, Sustainable building, Life Cycle Assessment

ÍNDICE

1. FUNDAMENTAÇÃO E OBJETIVOS	21
1.1. Introdução.....	21
1.2. Objetivos da Dissertação.....	23
1.3. Organização da Dissertação.....	24
2. CONCEITOS.....	25
2.1. Enquadramento Ambiental.....	25
2.2. Desenvolvimento Sustentável.....	26
2.3. Construção Sustentável.....	29
2.4. Alvenaria Estrutural.....	32
3. APRESENTAÇÃO DO CASO DE ESTUDO	37
4. METODOLOGIA	45
4.1. Avaliação da Sustentabilidade de Soluções para Paredes Exteriores.....	45
4.1.1. Apresentação das soluções construtivas.....	46
4.1.2. Definição dos parâmetros.....	49
4.1.3. Quantificação dos parâmetros.....	52
4.1.4. Normalização dos parâmetros.....	59
4.1.5. Agregação dos parâmetros.....	60
4.1.6. Determinação do nível de sustentabilidade.....	61
4.1.7. Perfil sustentável.....	62
4.2. Análise do Desempenho de Moradias Unifamiliares.....	63
4.2.1. Definição do objetivo e âmbito.....	64
4.2.2. Inventário de ciclo de vida.....	65
4.2.3. Avaliação dos impactes de ciclo de vida.....	66

5.	ANÁLISE DO CASO DE ESTUDO	69
5.1.	Soluções de Paredes Exteriores.....	69
5.1.1.	Quantificação dos parâmetros	69
5.1.2.	Normalização dos parâmetros	75
5.1.3.	Agregação dos parâmetros.....	76
5.1.4.	Resultados obtidos.....	76
5.2.	Moradias Unifamiliares	78
5.2.1.	Inventário de ciclo de vida	78
5.2.2.	Quantificação dos parâmetros	83
6.	CONSIDERAÇÕES FINAIS	105
6.1.	Discussão dos Resultados.....	105
6.2.	Conclusão	109
6.3.	Desenvolvimentos Futuros	111
7.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	113
	ANEXOS	115
	Anexo 1 – Caracterização térmica de cada solução de parede exterior	115
	Anexo 2 – Caracterização acústica de cada solução de parede exterior	117
	Anexo 3 – Caracterização térmica dos elementos construtivos	121
	Anexo 4 – Impactes referentes à utilização do XPS e da cortiça.....	124

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 – Emissão de GEE por setor.....	21
Figura 2 - Aumento do nível médio da água do mar.....	25
Figura 3 - Aumento das emissões de GEE.....	26
Figura 4 – Objetivos das três dimensões do Desenvolvimento Sustentável.....	28
Figura 5 - Abordagem integrada às fases do ciclo de vida de uma construção.....	31
Figura 6 - Bloco de betão.....	33
Figura 7 - Exemplo de paredes resistentes em alvenaria.....	33
Figura 8 - Exemplo de alvenaria armada.....	34
Figura 9 - Distribuição espacial das zonas de sismicidade do território português.....	34
Figura 10 - Paredes com aparelho tradicional.....	35
Figura 11 - Paredes com junta vertical contínua.....	35
Figura 12 – Face superior do Bloco BEST (para colocação da argamassa).....	37
Figura 13 – Face inferior do Bloco BEST (para assentamento sobre a argamassa).....	37
Figura 14 – Constituição da parede dupla de alvenaria de tijolo cerâmico (betão armado).....	38
Figura 15 – Constituição da parede com aplicação do Bloco BEST (alvenaria estrutural).....	39
Figura 16 – Alçado principal dos edifícios (orientado a Sul).....	40
Figura 17 - Alçado posterior dos edifícios.....	40
Figura 18 – Alçado lateral esquerdo dos edifícios.....	40
Figura 19 – Alçado lateral direito dos edifícios.....	41
Figura 20 – Planta do rés do chão dos edifícios.....	41
Figura 21 – Planta do andar dos edifícios.....	41
Figura 22 – Planta da cobertura dos edifícios.....	42
Figura 23 – Marcações da construção.....	42
Figura 24 – Abertura de fundações.....	42
Figura 25 – Colocação de armaduras nas sapatas.....	43
Figura 26 – Betonagem de fundação.....	43
Figura 27 – Início da execução de fiadas de bloco.....	43
Figura 28 – Nivelamento e alinhamento de fiadas.....	43
Figura 29 – Colocação de argamassa e armaduras de junta.....	43

Figura 30 – Colocação de bloco lintel.....	43
Figura 31 – Início da execução da laje	44
Figura 32 – Betonagem da laje	44
Figura 33 - Processo de execução das paredes	44
Figura 34 - Aspeto interior depois da betonagem da laje.....	44
Figura 35 - Fases de aplicação da metodologia MARS-SC	45
Figura 36 – Constituição da parede dupla de alvenaria de tijolo cerâmico (Parede 1).....	46
Figura 37 – Constituição da parede resistente com aplicação do Bloco BEST (Parede 2)	47
Figura 38 – Constituição da parede resistente em betão armado (Parede 3).....	48
Figura 39 – Constituição da parede estrutural de aço leve (Parede 4)	49
Figura 40 – Perfil sustentável onde a solução em estudo apresenta melhor desempenho	62
Figura 41 - Perfil sustentável onde a solução em estudo apresenta pior desempenho	62
Figura 42 - Estágios do ciclo de vida	63
Figura 43 – Fases de uma análise de Ciclo de Vida.....	64
Figura 44 – Comparação do ADP de cada parede	72
Figura 45 – Comparação do GWP de cada parede	72
Figura 46 – Comparação do ODP de cada parede.....	72
Figura 47 – Comparação do AP de cada parede	72
Figura 48 – Comparação do POCP de cada parede.....	73
Figura 49 – Comparação do EP de cada parede	73
Figura 50 – Comparação da contribuição das alvenarias para o impacte de cada edifício	88
Figura 51 – Contribuição dos quatro materiais com maiores impactes	89
Figura 52 – Contribuição dos materiais e do seu transporte	89
Figura 53 – Contribuição dos materiais e do seu transporte	93
Figura 54 – Contribuição da produção, do transporte e da deposição dos materiais.....	93
Figura 55 – Contribuição das necessidades nominais de energia	95
Figura 56 – Peso de cada uma das fases de vida útil	98
Figura 57 – Comparação dos edifícios no ADP	98
Figura 58 – Comparação dos edifícios no GWP	98
Figura 59 – Comparação dos edifícios no ODP.....	99
Figura 60 – Comparação dos edifícios no AP	99
Figura 61 – Comparação dos edifícios no POCP.....	99

Figura 62 – Comparação dos edifícios no EP	99
Figura 63 – Custo associado a cada fase do ciclo de vida dos edifícios.....	104
Figura 64 – Contributo das várias fases para o custo de ciclo de vida dos edifícios	104
Figura 65 – Processo de cálculo do índice de redução sonora (R_w) para a Parede 1.....	117
Figura 66 – Processo de cálculo do índice de redução sonora (R_w) para a Parede 2.....	118
Figura 67 – Processo de cálculo do índice de redução sonora (R_w) para a Parede 3.....	119
Figura 68 – Processo de cálculo do índice de redução sonora (R_w) para a Parede 4.....	120
Figura 69 – Comparação do ADP entre o XPS e a cortiça	124
Figura 70 – Comparação do GWP entre o XPS e a cortiça	124
Figura 71 – Comparação do ODP entre o XPS e a cortiça.....	124
Figura 72 – Comparação do AP entre o XPS e a cortiça	124
Figura 73 – Comparação do POCP entre o XPS e a cortiça.....	125
Figura 74 – Comparação do EP entre o XPS e a cortiça	125

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 – Datas importantes para o conceito de Desenvolvimento Sustentável.....	27
Tabela 2 - Os sete princípios da construção sustentável, segundo o CIB	29
Tabela 3 – Área dos imóveis.....	39
Tabela 4 – Indicadores de impacto ambiental considerados na base de dados de LCA	50
Tabela 5 – Quantificação do peso das dimensões e dos parâmetros analisados.....	52
Tabela 6 – Massa de cada um dos materiais constituintes da Parede 1 (referência)	53
Tabela 7 - Massa de cada um dos materiais constituintes da Parede 2	53
Tabela 8 - Massa de cada um dos materiais constituintes da Parede 3	53
Tabela 9 - Massa de cada um dos materiais constituintes da Parede 4	54
Tabela 10 – Valores das resistências térmicas superficiais	55
Tabela 11 – Valores das resistências térmicas dos espaços de ar não ventilados.....	55
Tabela 12 – Caracterização térmica dos materiais	56
Tabela 13 – Frequência crítica e quebra e quebra por efeito de coincidência dos materiais	58
Tabela 14 – Peso de cada indicador de Sustentabilidade no desempenho global	61
Tabela 15 – Avaliação de desempenho relativamente à solução de referência	62
Tabela 16 – Massa considerada para cada um dos materiais.....	65
Tabela 17 – Impactes associados a cada um dos materiais utilizados na Parede 1 (referência) 69	
Tabela 18 – Impactes associados a cada fase dos materiais utilizados na Parede 1 (referência)	70
Tabela 19 - Impactes associados a cada um dos materiais utilizados na Parede 2.....	70
Tabela 20 - Impactes associados a cada fase dos materiais utilizados na Parede 2.....	70
Tabela 21 - Impactes associados a cada um dos materiais utilizados na Parede 3.....	71
Tabela 22 - Impactes associados a cada fase dos materiais utilizados na Parede 3.....	71
Tabela 23 - Impactes associados a cada um dos materiais utilizados na Parede 4	71
Tabela 24 - Impactes associados a cada fase dos materiais utilizados na Parede 4.....	72
Tabela 25 – Coeficiente de transmissão térmica global (U) das paredes em estudo	73
Tabela 26 – Caracterização acústica de cada uma das paredes	74
Tabela 27 – Custo de construção para cada parede.....	75
Tabela 28 – Valor normalizado dos parâmetros.....	75

Tabela 29 – Desempenho de cada indicador.....	76
Tabela 30 – Caracterização da Sustentabilidade relativa de cada uma das soluções	77
Tabela 31 – Massa de cada um dos materiais utilizados na fase de construção.....	78
Tabela 32 – Intervenções de manutenção.....	80
Tabela 33 – Quantidade de materiais utilizados na manutenção.....	81
Tabela 34 – Quantidade de materiais utilizados em todo o ciclo de vida	82
Tabela 35 – Caracterização térmica dos edifícios	83
Tabela 36 – Coeficiente de transmissão térmica global (U) dos elementos construtivos	83
Tabela 37 – Caracterização dos vão envidraçados.....	84
Tabela 38 – Valores do desempenho energético	84
Tabela 39 – Caracterização do transporte de cada material	85
Tabela 40 – Impactes incorporados nos materiais utilizados no Edifício 1.....	86
Tabela 41 - Impactes incorporados nos materiais e no seu transporte para o Edifício 1.....	87
Tabela 42 – Impactes incorporados nos materiais utilizados no Edifício 2.....	87
Tabela 43 - Impactes incorporados nos materiais e no seu transporte para o Edifício 2.....	88
Tabela 44 – Caracterização do destino de cada um dos materiais.....	90
Tabela 45 - Impactes ambientais na manutenção do Edifício 1	91
Tabela 46 - Impactes relativos aos materiais, transporte e deposição no Edifício 1.....	91
Tabela 47 - Impactes ambientais na manutenção do Edifício 2.....	92
Tabela 48 - Impactes relativos aos materiais, transporte e deposição no Edifício 2.....	92
Tabela 49 – Impactes provocados pela energia no Edifício 1	94
Tabela 50 - Impactes provocados pela energia no Edifício 2	94
Tabela 51 – Quantificação dos materiais para deposição e caracterização do seu destino.....	96
Tabela 52 – Impactes relativos à deposição dos materiais.....	96
Tabela 53 – Impactes de cada uma das fases da vida útil do Edifício 1	97
Tabela 54 - Impactes de cada uma das fases da vida útil do Edifício 2	97
Tabela 55 – Custo de construção de cada um dos edifícios.....	100
Tabela 56 – Custo de mão de mão-de-obra, equipamentos e materiais a substituir.....	100
Tabela 57 – Custo de transporte e deposição dos materiais substituídos	101
Tabela 58 – Custos associados à fase de manutenção.....	101
Tabela 59 – Necessidade anuais de energia para aquecimento e arrefecimento	102
Tabela 60 – Necessidade anuais de energia para preparação de AQS	102

Tabela 61 – Custos na fase de operação de cada um dos edifícios.....	102
Tabela 62 – Custos de demolição	103
Tabela 63 – Custos de ciclo de vida dos edifícios	103
Tabela 64 – Organização das soluções por ordem decrescente de sustentabilidade.....	105
Tabela 65 – Caracterização térmica da Parede 1 (referência)	115
Tabela 66 - Caracterização térmica da Parede 2	115
Tabela 67 - Caracterização térmica da Parede 3	115
Tabela 68 - Caracterização térmica da Parede 4	116
Tabela 69 – Caracterização térmica da parede exterior do Edifício 1.....	121
Tabela 70 – Caracterização térmica da parede exterior do Edifício 2.....	121
Tabela 71 – Caracterização térmica dos pilares do Edifício 1.....	122
Tabela 72 – Caracterização térmica das vigas do Edifício 1	122
Tabela 73 – Caracterização térmica das vigas do Edifício 2	122
Tabela 74 – Caracterização térmica das caixas de estore (Edifício 1 e 2).....	123

ACRÓNIMOS

λ	Condutibilidade térmica
ADP	Potencial de diminuição das reservas de recursos abióticos
AP	Potencial de acidificação
CC	Custo de Construção
CIB	<i>International Council for Research and Innovation in Building and Construction</i>
ENR	Energia Não Renovável
EP	Potencial de eutrofização
EPS	Poliestireno expandido
ER	Energia Renovável
ETICS	<i>External Thermal Insulation Composite Systems</i>
GEE	Gases de Efeito de Estufa
GWP	Potencial de aquecimento global
Hz	Hertz
IA	Indicador Ambiental
IE	Indicador Económico
IF	Indicador Funcional
IPCC	<i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i>
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
IUCN	<i>International Union for Conservation of Nature</i>
IVA	Imposto sobre Valor Acrescentado
LCA	<i>Life Cycle Assessment</i> (Avaliação do Ciclo de Vida)
LCI	<i>Life Cycle Inventory</i> (Inventário do Ciclo de Vida)
MARS-SC	Metodologia de Avaliação Relativa de Sustentabilidade de Soluções Construtivas
ODP	Potencial de destruição da camada de ozono
ONU	Organização das Nações Unidas
OSB	<i>Oriented Strand Board</i>
PEC	<i>Primary Energy Consumption</i> (Energia primária incorporada)
POCP	Potencial de oxidação fotoquímica

RCD's	Resíduos da Construção e Demolição
Rw	Índice de redução sonora
UE	União Europeia
UNEP	<i>United Nations Environment Programme</i>
UNESCO	<i>United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization</i>
USEPA	<i>United States Environmental Protection Agency</i>
WWF	<i>World Wildlife Fund</i>
XPS	Poliestireno expandido extrudido

1. FUNDAMENTAÇÃO E OBJETIVOS

1.1. Introdução

A indústria da construção é um dos maiores e mais ativos setores em toda a Europa, com uma faturação anual de 750 milhões de euros, sendo o setor que representa 25% de toda a produção europeia, e com uma exportação mundial de 52% do mercado, tornando-se dessa forma uma das atividades mais importantes para o desenvolvimento das civilizações (Torgal e Jalali, 2010).

Inicialmente as construções serviam apenas como abrigo, sendo que ao longo dos séculos e com o desenvolvimento de novas técnicas este paradigma foi-se alterando, e atualmente observa-se um extenso leque de tipologias de construções destinadas a vários tipos de utilização. Contudo, este desenvolvimento de novas técnicas de construção, para além de trazer vários benefícios para a sociedade, tem sido um dos principais responsáveis pela degradação do meio ambiente, da qual advêm outro tipo de problemas, sejam ambientais, sociais ou económicos, que prejudicam o Homem e todo o meio que o rodeia, pondo mesmo em risco as gerações futuras. Estes problemas passam pela poluição ambiental, através de emissões de dióxido de carbono para a atmosfera, representando tal como indicado na Figura 1 cerca de 6% de emissão de GEE (Gases de Efeito de Estufa), pela excessiva produção de resíduos associados à construção e demolição de edifícios responsáveis pela poluição de águas e solos e pelo consumo desmedido de recursos naturais.

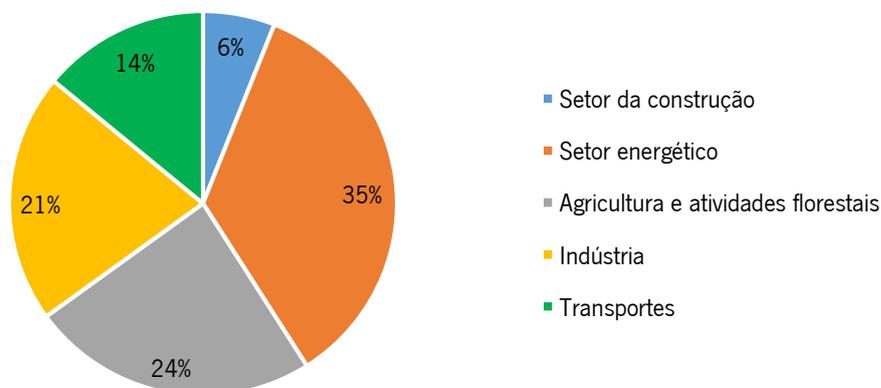


Figura 1 – Emissão de GEE por setor (IPCC, 2015)

Assim sendo, existe a necessidade constante de desenvolvimento de materiais, processos e metodologias construtivas por forma a cumprir os requisitos de conforto atuais, mas tendo em conta a necessidade de reduzir significativamente os problemas ambientais que surgem associados ao setor da construção civil. Pretende-se, assim, uma construção eficiente, que respeite as contingências locais e cujo impacte sobre o meio envolvente natural seja mínimo (Bragança, 2008).

Esta dissertação aborda em particular dois sistemas construtivos utilizados em edifícios de habitação, nomeadamente o sistema construtivo em betão armado com paredes de alvenaria de enchimento e a alvenaria estrutural com blocos de betão e armadura de junta. Apesar do sistema de alvenaria estrutural não ser uma solução corrente em Portugal, considera-se que poderá ser competitivo com a solução tradicional e poderá ter vantagens do ponto de vista ambiental. Este sistema construtivo foi desenvolvido recentemente na Universidade do Minho, tendo sido feita ampla validação experimental do comportamento individual das paredes (Haach, Vasconcelos e Lourenço, 2010) e de edifícios construídos em escala reduzida e ensaiados em mesa sísmica com o objetivo de avaliar o comportamento sísmico (Lourenço, Avila e Gonçalves, 2013) e a sua aplicabilidade em regiões com diferentes níveis de sismicidade (Marques, Vasconcelos e Lourenço, 2012).

1.2. Objetivos da Dissertação

Neste trabalho aborda-se o tema da sustentabilidade aplicado ao setor da construção. Este tema é ainda muito atual em Portugal, e muitas vezes erradamente associado a produtos apenas como estratégia de *marketing* com o objetivo de aumentar os lucros, o que levou à sua descredibilização. Assim, com a elaboração desta dissertação pretende-se divulgar conceitos relacionados com o tema “Construção Sustentável” e a sua aplicação aos edifícios. Para além disso, o objetivo é avaliar o ciclo de vida de um sistema construtivo em alvenaria estrutural, e comparar com o sistema tradicional. Numa primeira fase pretende-se tirar conclusões relativamente ao seu comportamento ao nível da zona corrente da parede, através da aplicação da MARS-SC. Por fim, avaliar o ciclo de vida do edifício em alvenaria estrutural tendo como finalidade comparar o seu desempenho térmico, o custo de ciclo de vida e os impactes resultantes das soluções adotadas, para obter o peso relativo de cada uma das fases no desempenho global.

Em suma, os principais objetivos da dissertação são:

- Abordar temas relacionados com a Sustentabilidade aplicada ao setor da construção;
- Analisar o ciclo de vida de um sistema construtivo em alvenaria estrutural, em comparação com o sistema tradicional.
- Reunir exemplos práticos de soluções para a envolvente exterior de edifícios que ao serem aplicados permitem atingir ou aproximar a construção dos objetivos do desenvolvimento sustentável;
- Estudar as várias fases do ciclo de vida de edifícios de habitação e demonstrar quais as que acarretam maiores encargos económicos e impactes para o meio ambiente.

1.3. Organização da Dissertação

A exposição dos vários temas abordados neste trabalho está organizada em cinco capítulos.

Inicialmente, no Capítulo 1 é feito um enquadramento ao trabalho enunciando as motivações para o seu desenvolvimento e os objetivos que se pretendem alcançar.

No Capítulo 2 são abordados alguns conceitos relacionados com os temas abordados nesta dissertação, como a sustentabilidade e a sua aplicabilidade ao setor da construção tal como dos sistemas construtivos em alvenaria estrutural.

No terceiro capítulo é apresentado o caso de estudo, expondo a base deste trabalho, sendo no capítulo seguinte exposta cada uma das fases da metodologia aplicada no estudo tal como as considerações tomadas.

O Capítulo 5 divide-se em dois subcapítulos: (1) no primeiro é feita a aplicação da Metodologia de Avaliação Relativa de Sustentabilidade de Soluções Construtivas (MARS-SC) a quatro soluções para paredes exteriores, por forma a hierarquizar as mesmas de acordo com a sua Sustentabilidade; (2) no segundo subcapítulo são estudados e comparados dois edifícios de habitação onde são aplicados o sistema construtivo em alvenaria estrutural e o convencional, fazendo a sua análise nos três indicadores de Sustentabilidade. A avaliação teve em conta as várias fases do ciclo de vida, a construção, a utilização (que inclui a manutenção e a operação) e a demolição/desconstrução de cada um dos imóveis.

No sexto e último capítulo são apresentadas as considerações finais do trabalho, sendo apresentada a discussão dos resultados, conclusões e sugestões para desenvolvimentos futuros ao nível de sistemas construtivos, tal como melhorias a aplicar na alvenaria estrutural, por forma a melhorar o desempenho em cada um dos indicadores de Sustentabilidade.

2. CONCEITOS

2.1. Enquadramento Ambiental

A Terra está cada vez mais sujeita a agressões provocadas pelas várias atividades que o ser humano desenvolve, sendo cada vez mais importante a consciencialização para esse facto.

Desde 1850 têm-se vindo a acentuar os efeitos negativos provocados sobre o ambiente, tendo a temperatura média assumido um percurso ascendente desde há várias décadas, sendo de salientar o crescimento acentuado nos últimos anos, o que tem levado a uma maior frequência de ocorrência de fenómenos atmosféricos extremos como períodos de seca, incêndios, chuvas torrenciais, inundações ou furacões (Torgal e Jalali, 2010). Para além disso, é possível verificar na Figura 2 que o nível médio da água do mar teve um aumento de cerca de 20 centímetros durante o século XX, o que pode levar ao desaparecimento de zonas costeiras pondo em risco a sobrevivência de partes do Planeta devido à contaminação da água doce.

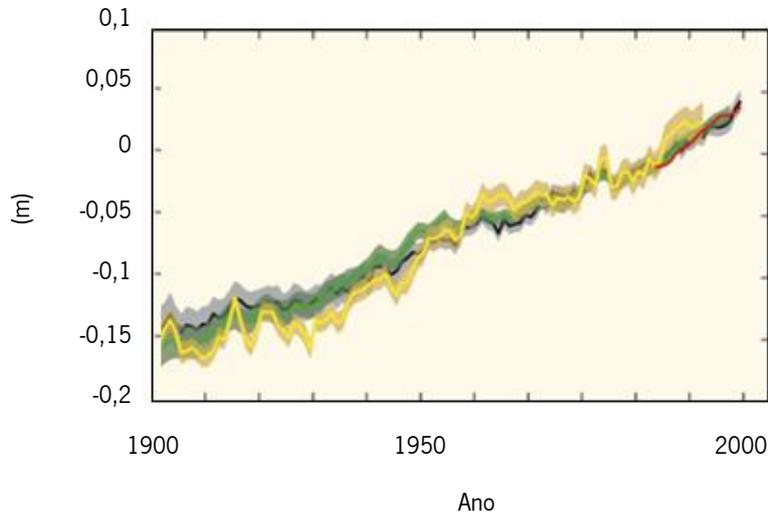


Figura 2 - Aumento do nível médio da água do mar (IPCC, 2015)

Da mesma forma, e tal como se pode verificar na Figura 3, as concentrações de gases de efeito de estufa (dióxido de carbono, metano e óxido nítrico) têm tomado o mesmo rumo, tendo crescido abruptamente desde 1950, registando ultimamente valores sem precedentes.

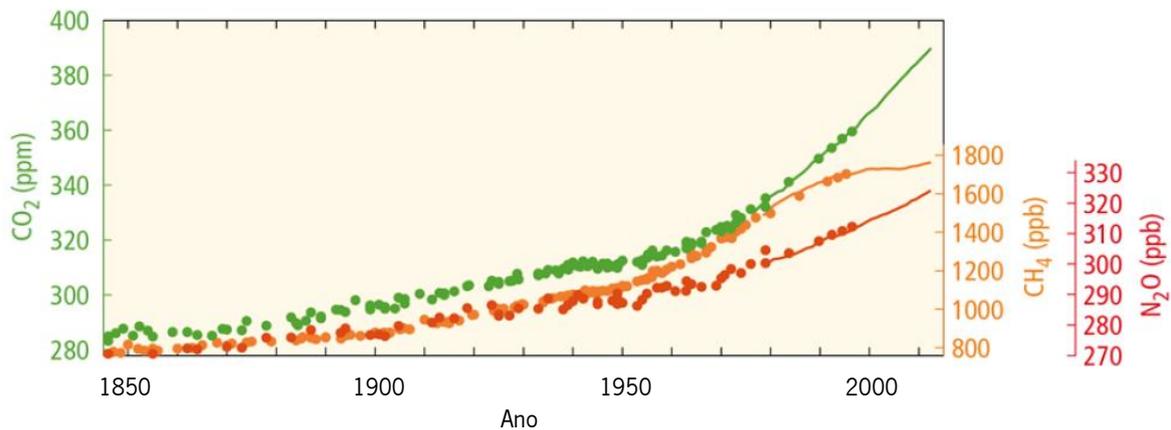


Figura 3 - Aumento das emissões de GEE (IPCC, 2015)

Estima-se que durante este século todos estes fenómenos atmosféricos se venham a acentuar, sendo que irão influenciar negativamente a vivência de algumas comunidades, devido à possível falta de alimentos, água potável e consequente aumento da pobreza extrema (IPCC, 2015).

2.2. Desenvolvimento Sustentável

O conceito de Desenvolvimento Sustentável foi até agora definido de diferentes modos, sendo que o mais consensual é o presente no relatório de Brundtland de 1987 que diz que o desenvolvimento sustentável é o que “*permite satisfazer as necessidades do presente sem comprometer a possibilidade das gerações do futuro satisfazerem as suas*” (Brundtland, 1987). Desde então a expressão suscitou interesse na comunidade científica, tendo havido um crescimento acentuado na sua pesquisa e utilização como palavra-chave de artigos publicados em revistas científicas internacionais referenciadas na base de dados Scopus–Elsevier (Torgal, Jalali, 2010). Contudo, e tal como indicado anteriormente, as preocupações com o Desenvolvimento Sustentável começaram antes de 1987, sendo apresentada na Tabela 1 uma cronologia dos acontecimentos mais importantes.

Tabela 1 – Datas importantes para o conceito de Desenvolvimento Sustentável (Torgal, Jalali, 2010)

Ano	Acontecimento
1962	Publicação do Livro “ <i>A Primavera Silenciosa</i> ” da autoria do Biologista Rachel Carson
1972	Apresentação do Relatório “Os Limites do Crescimento” pelo Clube de Roma
	Realização da Conferência da ONU sobre o Ambiente Humano em Estocolmo que origina a criação do Programa da ONU para o Meio Ambiente - UNEP
1979	Realização da Convenção de Berna sobre a proteção dos Habitats
	Realização da Convenção de Berna sobre a poluição do ar
1980	A IUCN em conjunto com a ONU, a WWF e a UNESCO apresentam um documento estratégico sobre a conservação da natureza
	Apresentação do Relatório Global 2000
1983	Protocolo da ONU sobre Qualidade do ar (Helsínquia)
	Comissão das Nações Unidas Sobre Ambiente e Desenvolvimento
1987	Protocolo de Montreal sobre as substâncias que contribuem para a redução da camada de Ozono
	Apresentação do Relatório de Brundtland onde aparece definida a expressão “Desenvolvimento Sustentável”
1990	Relatório da UE sobre Ambiente Urbano
1992	Realização da Cimeira do Rio
1997	Realização da Conferência de Quioto sobre aquecimento global
2007	O IPCC publica o 4º relatório de progresso
	Al Gore protagoniza o filme “Uma Verdade Inconveniente”
	O IPCC e Al Gore recebem o prémio Nobel da Paz
2009	Realização da Conferência de Copenhaga sobre alterações climáticas

Da lista anterior é de salientar o Protocolo de Quioto que constitui o instrumento mais importante na mitigação das alterações climáticas. Com base nos dados de 1990, os signatários do protocolo comprometeram-se a diminuir as emissões de GEE em 5,2% até 2012. No entanto as metas mais ambiciosas foram estabelecidas pela Comunidade Europeia, que definiu uma redução das emissões em 8% e, para alcançar esse objetivo, cada País recebeu metas individuais tendo em conta do seu desenvolvimento económico (Torgal, Jalali, 2010).

Quando é abordado o tema do Desenvolvimento Sustentável deve ter-se em conta que nenhuma das suas Dimensões - Ambiental, Económica e Social – é dissociável das restantes, e todas as ações desenvolvidas com vista a cumprir este objetivo devem atuar simultaneamente e

equitativamente em todas elas. Desse ponto de vista, na Figura 4 são identificados os objetivos a atingir em cada Dimensão.

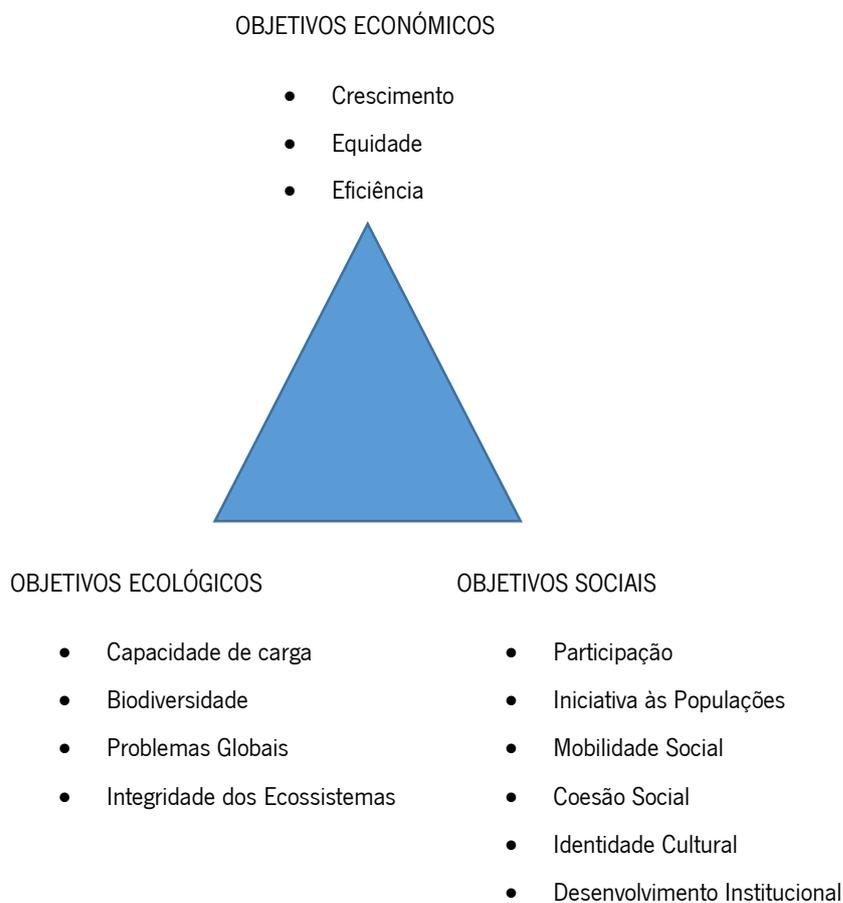


Figura 4 – Objetivos das três dimensões do Desenvolvimento Sustentável (Pinheiro, 2006)

O crescimento económico sustentado é essencial para a satisfação das necessidades do ser humano, devendo dessa forma contribuir para uma maior equidade social e proteção ambiental.

Para o cumprimento dos objetivos ambientais é essencial racionalizar o uso de recursos naturais, de combustíveis fósseis, de volume de resíduos produzidos e consequentemente os níveis de poluição. Assim, será preservada a integridade dos ecossistemas e a sua biodiversidade.

Por sua vez, o desenvolvimento social sustentável deve permitir uma sociedade equilibrada e racional na procura de um estilo de vida adaptado ao presente e ao mesmo tempo a pensar no futuro e nas gerações vindouras. Desta forma, procura-se que o desenvolvimento da sociedade

se expresse numa melhoria significativa da qualidade de vida da população mundial, através da procura da justiça social, da segurança e da paz.

2.3. Construção Sustentável

O desenvolvimento sustentável deve ser um tema que envolva todos os intervenientes na indústria da construção, dada a sua responsabilidade relativamente aos impactes provocados sobre o Ambiente, uma vez que é uma atividade económica com grande impacte sobre o território, com um elevado nível de extração de matérias-primas não renováveis, elevados consumos energéticos durante todo o ciclo de vida da construção e consequentes emissões de gases responsáveis pelos efeitos de estufa.

O conceito de sustentabilidade aplicado à construção começou a ganhar maior importância na conferência do Rio de Janeiro em 1992, sendo o termo “Construção Sustentável” proposto pela primeira vez pelo Professor Kibert em 1994, considerando que este não é mais do que o emprego dos objetivos do desenvolvimento sustentável a este setor, na criação e manutenção de um ambiente construído saudável, baseado na utilização eficiente de recursos e em princípios ecológicos (Kibert, 1994).

Com base nesta definição, o CIB apresentou os sete princípios, indicados na Tabela 2, que são considerados como a base da Construção Sustentável, que ao serem respeitados nos processos de decisão conduzem à criação de edifícios mais sustentáveis (Mateus, 2009).

Tabela 2 - Os sete princípios da construção sustentável, segundo o CIB (Kibert, 2012)

Princípios
Reduzir o consumo de recursos (Reduzir)
Reutilizar recursos (Reutilizar)
Utilizar recursos recicláveis (Reciclar)
Proteger a Natureza (Natureza)
Eliminar os produtos tóxicos (Resíduos Tóxicos)
Analisar os custos de ciclo de vida (Economia)
Assegurar a qualidade (Qualidade)

Estes sete princípios devem ser aplicados em todo o ciclo de vida de um edifício, desde a fase mais preliminar de projeto até à demolição/desconstrução, sendo aplicados também aos recursos necessários para criar e manter o ambiente construído durante a totalidade do seu ciclo de vida: terreno, materiais, água, energia e ecossistemas (Mateus, 2009).

Assim sendo, devem ser tidos em conta os seguintes aspetos nas várias fases dos imóveis:

- **Economizar energia e água.** Deve ser aplicada uma gestão eficiente da água e da energia durante todo o ciclo de vida, uma vez que a produção de energia depende em grande parte de combustíveis fósseis, levando a um elevado impacte ambiental, sendo também importante o facto de ser utilizado um recurso natural limitado e não renovável. Tendo isso em conta é essencial a utilização de energia proveniente de fontes renováveis e a escolha de soluções que permitam garantir o conforto dos edifícios com uma menor dependência de energia.
- **Assegurar a salubridade dos edifícios.** Proporcionar conforto no interior dos edifícios com recurso a uma otimização da iluminação e ventilação natural.
- **Maximizar a durabilidade dos edifícios.** Aplicar materiais e tecnologias construtivas duráveis e que permitam a sua adaptação a novas utilizações, prolongando a sua vida e evitando a aplicação de novos materiais.
- **Planear a conservação e a manutenção dos edifícios.** Devido ao envelhecimento dos materiais há necessidade de investimentos periódicos por forma a conservar e manter os edifícios em boas condições, sendo que essas intervenções devem ser planeadas ainda na fase de Projeto, por forma a aumentar o seu ciclo de vida e todas as vantagens daí resultantes
- **Utilizar materiais eco eficientes.** É essencial a utilização de materiais que durante o ciclo de vida têm baixo impacte ambiental. Para isso não devem possuir químicos nocivos à camada de ozono, devem ser duráveis, necessitar de pouca manutenção, estar disponíveis próximo do local de construção, incorporar baixa energia primária (PEC) e ter como base de produção materiais reciclados, e que tenham potencialidade para serem reciclados ou reutilizados.

- **Apresentar baixa massa de construção.** Quanto menor for a massa total do edifício menor será a quantidade de recursos naturais incorporada.
- **Minimizar a produção de resíduos.** A produção de resíduos está presente em todas as fases da vida dos materiais de construção (produção, armazenamento, transporte, construção, manutenção e demolição), Contudo, é a fase de construção responsável pela maior produção de resíduos, podendo este problema ser minimizado com a utilização de sistemas pré-fabricados.
- **Ser económica.** Uma construção só é sustentável se depois de integrados os princípios anteriores, o seu custo for competitivo quando comparado com a construção tradicional. Para isso devem ser utilizados sistemas construtivos simples, padronizados, com menor mão-de-obra e que proporcionem a redução dos custos de manutenção.
- **Garantir condições de higiene e segurança nos trabalhos de construção.** Escolher os materiais e processos de construção, tendo em linha de conta a facilidade de execução, potenciando a diminuição de exposição dos trabalhadores aos riscos (Mateus, 2009).

Tendo em conta todos estes princípios, apresentam-se na Figura 5, as principais considerações a ter em conta em cada uma das fases do ciclo de vida de uma construção.

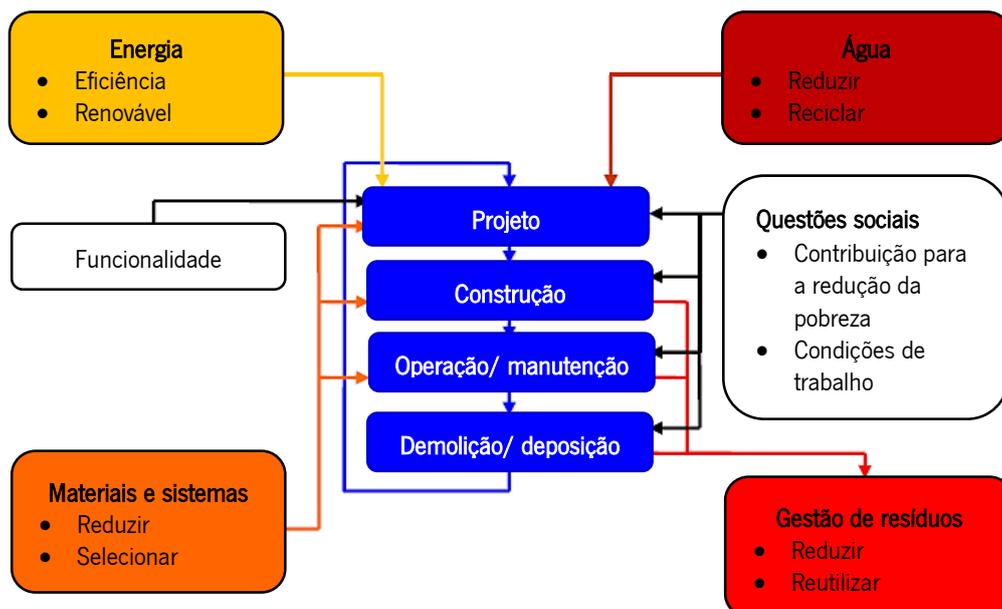


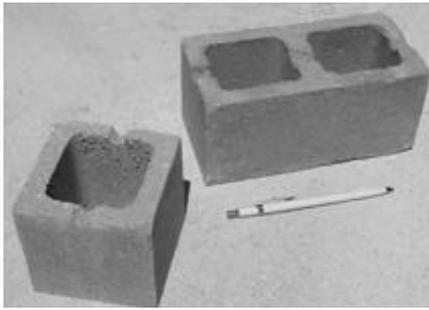
Figura 5 - Abordagem integrada às fases do ciclo de vida de uma construção (Mateus, 2009)

2.4. Alvenaria Estrutural

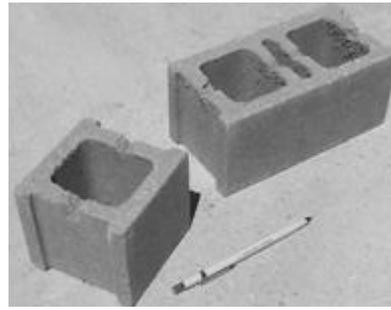
O sistema construtivo em Alvenaria estrutural continua a ser utilizado em edifícios de pequeno e médio porte em diferentes países europeus como Alemanha e Itália, motivado por vantagens associadas, para além da tradição, à simplicidade na tecnologia de construção, promoção de alta qualidade do ambiente interior, durabilidade e resistência ao fogo. Em Portugal, a utilização de alvenaria estrutural é bastante inferior, particularmente em edifícios de habitação de pequeno a médio porte, onde poderá ser competitiva com a solução tradicional de betão armado (Gouveia, Lourenço e Vasconcelos, 2007) (Lourenço, Vasconcelos e Medeiros, 2010). Deve salientar-se que existe ainda alguma inércia de entidades consideradas essenciais para uma colaboração eficaz na implantação deste tipo de tecnologias, como por exemplo as escolas de engenharia civil que ainda mantêm a componente estrutural dedicada quase em exclusivo à tecnologia do betão armado, raramente abordando, de forma clara, as vantagens e desvantagens de outras soluções construtivas alternativas. Em termos de projeto, o normal é serem postos em prática conhecimentos adquiridos na formação, havendo alguma inércia no recurso à aprendizagem de novas metodologias ou de aplicação de novos materiais.

A indústria da construção de uma forma geral não tem tido a motivação de avaliar ou apoiar o desenvolvimento de conhecimentos de diferentes processos com o objetivo de inovar, avaliar as vantagens económicas, construtivas e em simultâneo o tempo de execução (Gouveia, Lourenço e Vasconcelos, 2007). Estes são alguns dos aspetos que continuam a ser preponderantes para a resistência do mercado a soluções que mesmo sendo inovadoras em vários aspetos continuam a não ser tidas em conta na altura de projetar.

A solução construtiva de alvenaria estrutural avaliada neste trabalho é baseada na utilização de blocos de betão normal. Estes podem ser de duas ou três células (Figuras 6 e 7, respetivamente) de modo a que, nos casos onde seja necessário, as armaduras verticais possam ser facilmente colocadas. Os blocos de duas células apresentam geometria semelhante aos blocos de betão atualmente comercializados e usados em paredes de alvenaria não estrutural (Alves, 2011).



a) Duas células



b) Três células

Figura 6 - Bloco de betão (Haach, 2009)

Nos dias de hoje a adoção de uma solução de alvenaria depende apenas de aspetos de natureza estrutural, embora os aspetos não estruturais possam condicionar a sua escolha. De acordo com o Eurocódigo 6, podem-se definir as soluções mais usuais de alvenaria em simples, armada e confinada, abordando-se no presente trabalho apenas as duas primeiras.

A alvenaria simples, representada na Figura 7 pode ser definida como um conjunto de unidades dispostas de forma definida e ligadas por argamassa, não recorrendo a outro tipo de elementos resistentes e devendo ser limitada a zonas de baixa sismicidade (Gouveia, Lourenço e Vasconcelos, 2007).

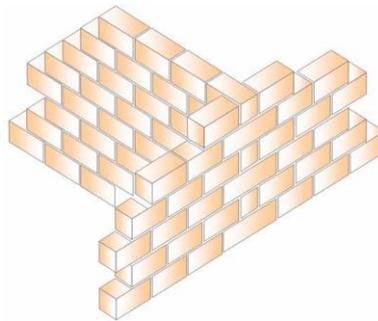


Figura 7 - Exemplo de paredes resistentes em alvenaria (Gouveia, Lourenço e Vasconcelos, 2007)

A alvenaria armada, tal como é possível verificar na Figura 8 diferencia-se pela existência de reforço com recurso a varões ou redes de aço de forma a elaborar uma estrutura solidária. Normalmente a armada horizontal é embebida na argamassa, enquanto a vertical é aplicada na furação dos blocos ou com recurso a montantes (Alves, 2011). Este tipo de solução, comparativamente à referida anteriormente, apresenta melhores características mecânicas e

comportamento estrutural melhorado no que se refere a redistribuição de tensões, dissipação de energia e valores últimos da resistência ao corte, quando sujeita a ações horizontais (Gouveia, Lourenço, 2006) como consequência da ocorrência de sismos.

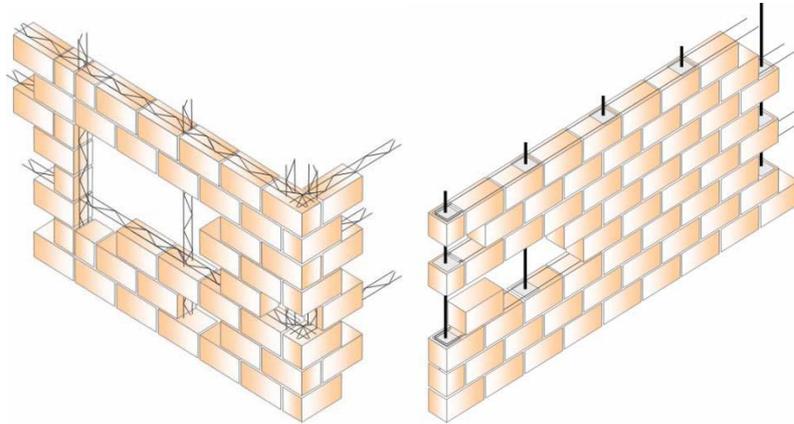


Figura 8 - Exemplo de alvenaria armada (Gouveia, Lourenço e Vasconcelos, 2007)

Tal como indicado anteriormente, a solução de alvenaria a adotar (simples ou armada) deve ter em consideração a localização do edifício a construir, tendo sempre presente que tal como representado na Figura 9, Portugal é um país com diferentes índices de risco sísmico em função do tipo de ação.

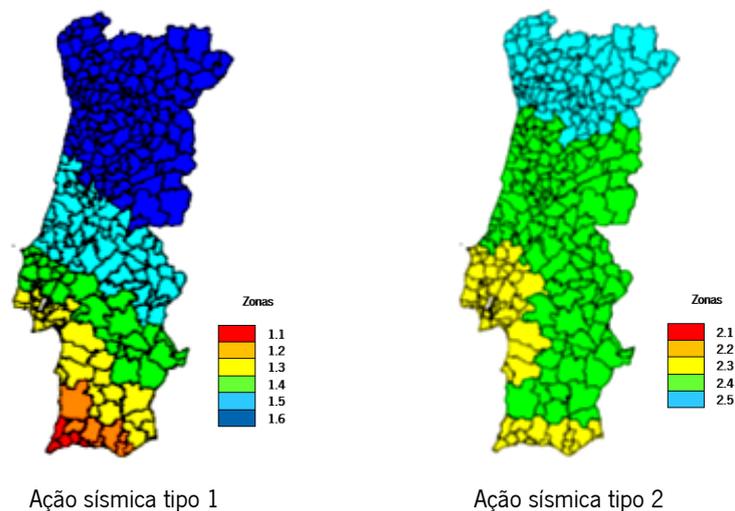


Figura 9 - Distribuição espacial das zonas de sismicidade do território português (EN1998-1, 2010)

Na solução de alvenaria armada em estudo podem-se adotar dois tipos de aparelho distintos de acordo com o tipo de unidades de alvenaria utilizadas e com o esquema de armaduras. No caso

do aparelho tradicional, na utilização de blocos de duas células, as armaduras são colocadas nas células verticais e no caso de blocos de três células poderão ser colocados na célula central ou na célula formada pelas abas exteriores, como demonstra a Figura 10 (Alves, 2011).

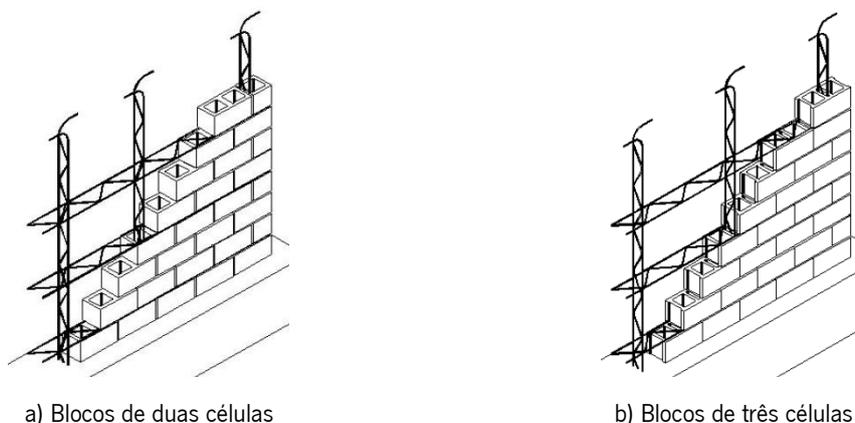


Figura 10 - Paredes com aparelho tradicional (Mosele, Modena e Di Fusco, 2006)

Um aparelho alternativo é o representado na Figura 11 que consiste em paredes de alvenaria armada com junta contínua. Neste caso tanto nos blocos com duas como com três células as armaduras são colocadas numa junta vertical contínua, a qual necessita da utilização alternada de meios blocos adjacentes à junta vertical (Alves, 2011).

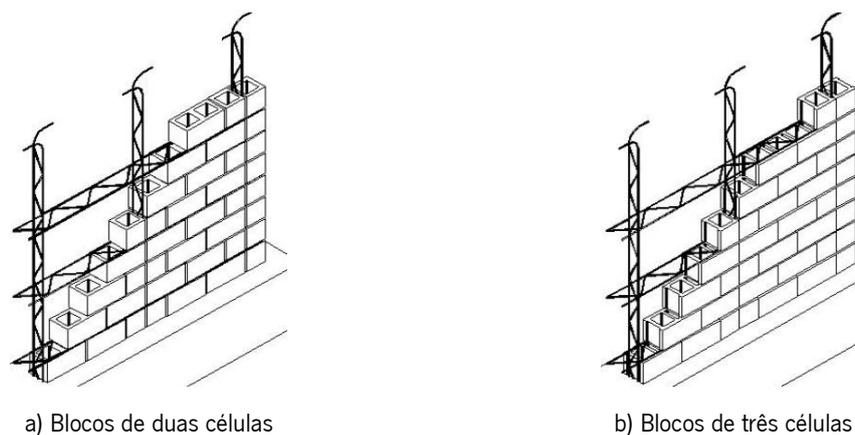


Figura 11 - Paredes com junta vertical contínua (Mosele, Modena e Di Fusco, 2006)

No caso do aparelho tradicional, as armaduras têm obrigatoriamente de ser colocadas por troços e sobrepostas, havendo a necessidade de respeitar os comprimentos de amarração regulamentares. A consideração do aparelho alternativo visa a simplificação da tecnologia de

construção dado que as armaduras verticais podem ser contínuas e o assentamento dos blocos pode fazer-se exatamente como é feito em alvenaria não estrutural (Alves, 2011).

Assim, é necessário ter em conta que a construção em alvenaria estrutural deve procurar garantir requisitos de comportamento mecânico adequado quando sujeita a ações, bem como garantir o cumprimento das exigências térmicas e acústicas regulamentares.

3. APRESENTAÇÃO DO CASO DE ESTUDO

O caso de estudo avalia o desempenho da alvenaria estrutural para a envolvente exterior de edifícios de habitação. Este é baseado na utilização de um bloco de alvenaria em betão, denominado Bloco BEST, desenvolvido no âmbito do projeto “ALVEST – Desenvolvimento de soluções de paredes em Alvenaria Estrutural” numa parceria entre a Universidade do Minho e o Instituto Superior de Engenharia de Coimbra. O projeto iniciou-se com estudos de formulação da composição do betão para a produção do bloco, tendo sido ensaiadas diferentes misturas com o objetivo de efetuar uma comparação de resultados por forma a definir todas as características. Depois de obtida a solução otimizada em termos funcionais e económicos, a unidade de alvenaria ficou com 40 centímetros de comprimento, 19 de altura e 20 de largura, a massa de 13,5 Kg e o custo de produção de 0,29 euros.

Nas Figuras 12 e 13, apresentam-se dois esquemas com a geometria do bloco que foi produzido, testado e avaliado.

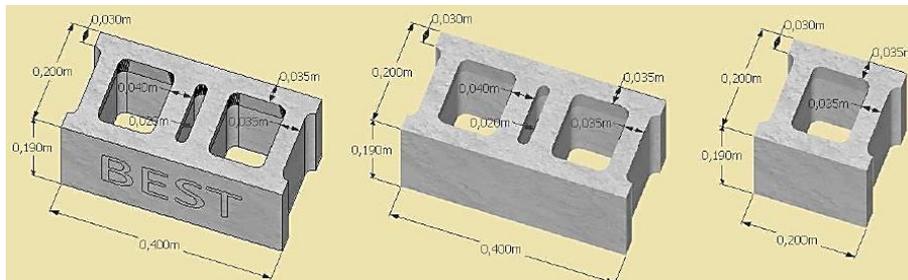


Figura 12 – Face superior do Bloco BEST (para colocação da argamassa) (Projecto Alvest, 2013)

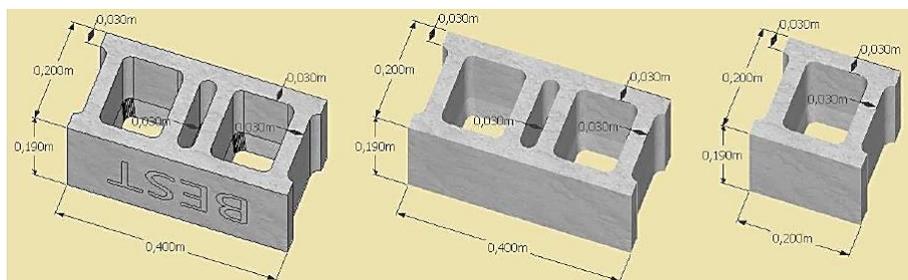


Figura 13 – Face inferior do Bloco BEST (para assentamento sobre a argamassa) (Projecto Alvest, 2013)

Depois de definidas todas as características relativas à sua produção, um dos objetivos do projeto de desenvolvimento do Bloco BEST era proceder à construção de dois imóveis similares, um em que fosse aplicado o sistema construtivo convencional, o betão armado (Edifício 1), e o outro com recurso à alvenaria estrutural com utilização do Bloco BEST (Edifício 2). Assim seria possível a monitorização durante o seu ciclo de vida, por forma a perceber o comportamento.

Os dois imóveis foram projetados para serem casas geminadas, do tipo T3 e construídas em terrenos adjacentes em Casal Comba, concelho da Mealhada.

A constituição das paredes exteriores é apresentada nas Figuras 14 e 15, sendo que no caso do Edifício 1 é utilizada a parede dupla em tijolo cerâmico com isolamento em XPS de 4 centímetros na caixa de ar e acabamentos em reboco tradicional de 1,5 centímetros e pintura, tendo uma espessura total de 35 centímetros. No Edifício 2 é utilizada a parede resistente com aplicação do Bloco BEST, com isolamento pelo exterior (ETICS) com 5 centímetros de XPS e 0,5 centímetros de reboco armado. O acabamento interior é em reboco tradicional de 1,5 centímetros, totalizando 27 centímetros de espessura.

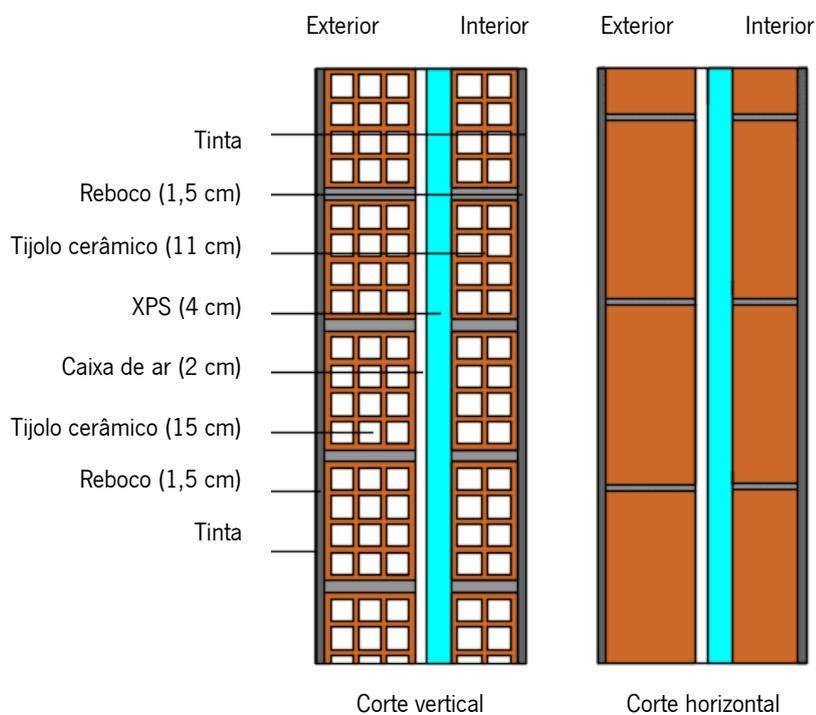


Figura 14 – Constituição da parede dupla de alvenaria de tijolo cerâmico (betão armado)

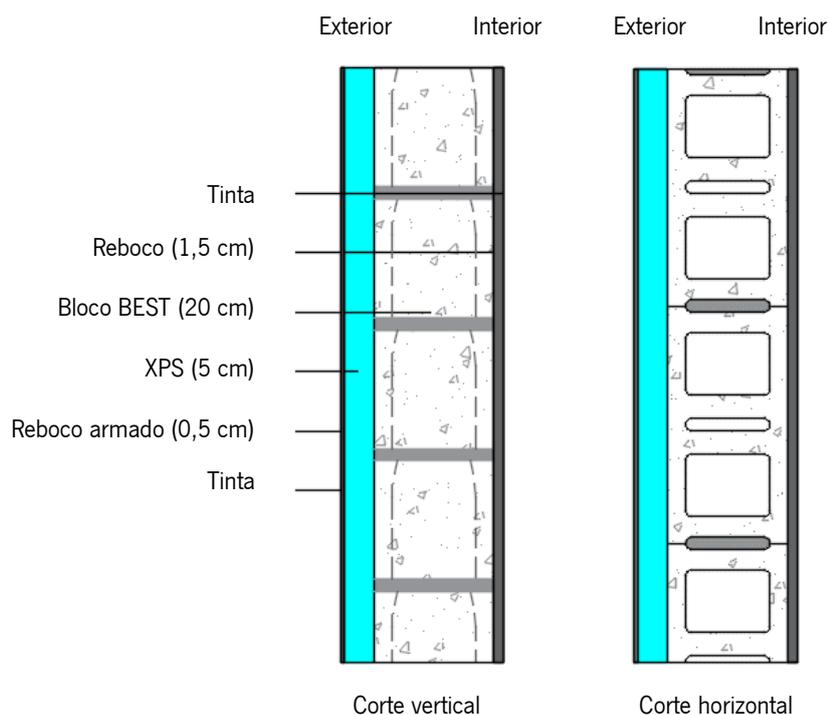


Figura 15 – Constituição da parede com aplicação do Bloco BEST (alvenaria estrutural)

Os edifícios estudados têm as áreas indicadas na Tabela 3, verificando-se que devido a exigências estruturais a área bruta do Edifício 2 é ligeiramente inferior. É possível verificar que o Edifício 1 mesmo tendo uma área bruta superior, a área útil é inferior, devido à maior espessura das paredes e à diferente organização dos espaços dentro de cada uma das habitações. Note-se que a organização do espaço interior definida na solução de alvenaria estrutural está relacionada com a necessidade de prever paredes resistentes em ambas as direções de desenvolvimento do edifício. Assim, permite que o edifício tenha uma configuração de paredes resistentes equilibrada, para fazer face a ações horizontais devido aos sismos (Marques, Vasconcelos e Lourenço, 2012).

Tabela 3 – Área dos imóveis

	Edifício 1	Edifício 2
Área bruta (m ²)	228,7	222,1
Área útil (m ²)	187	190

Por forma o tornar explícitas as diferenças na arquitetura dos edifícios, entre a Figura 16 e 22 são apresentados os alçados e plantas de cada um dos imóveis, sendo que as restantes características são apresentadas na secção



Figura 16 – Alçado principal dos edifícios (orientado a Sul)

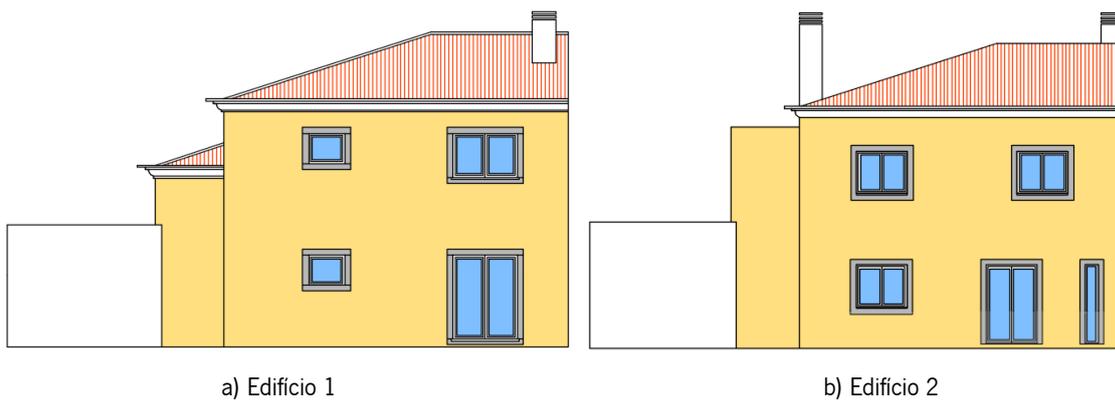


Figura 17 - Alçado posterior dos edifícios

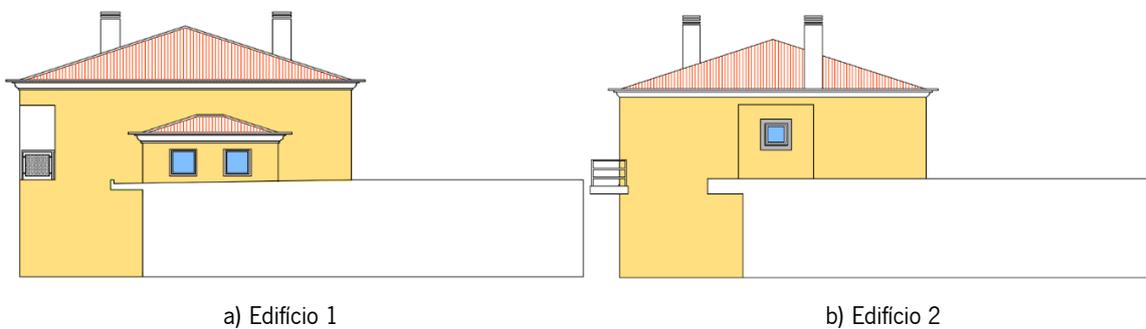


Figura 18 – Alçado lateral esquerdo dos edifícios

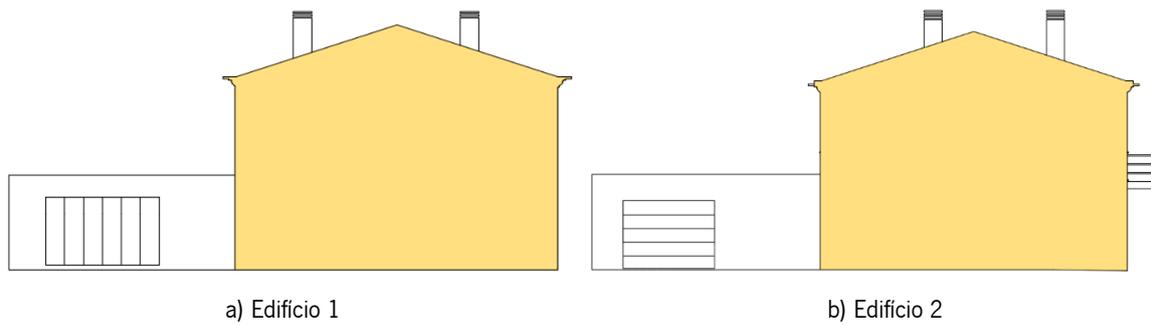


Figura 19 – Alçado lateral direito dos edifícios

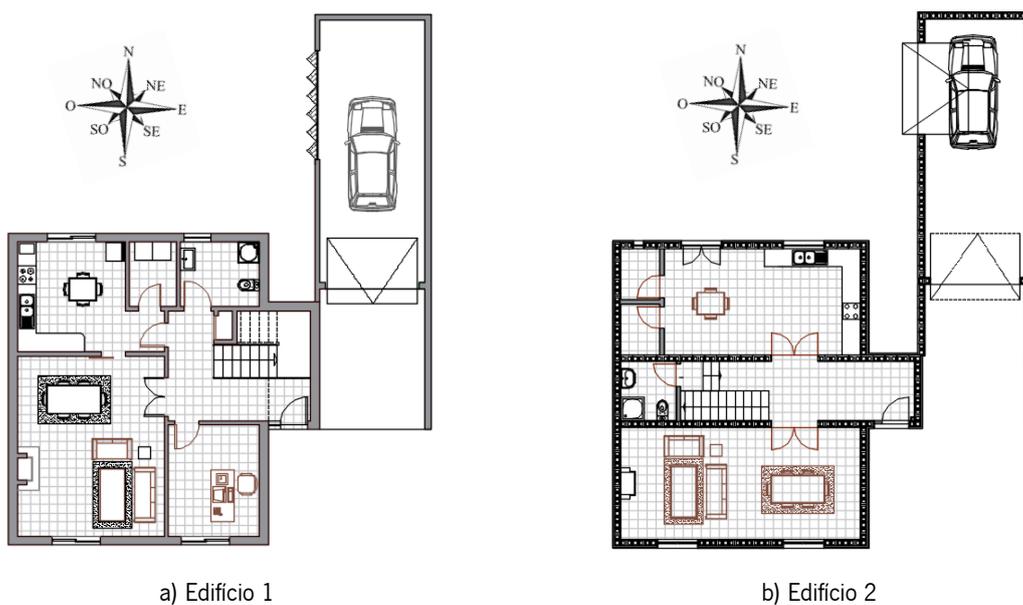


Figura 20 – Planta do rés do chão dos edifícios

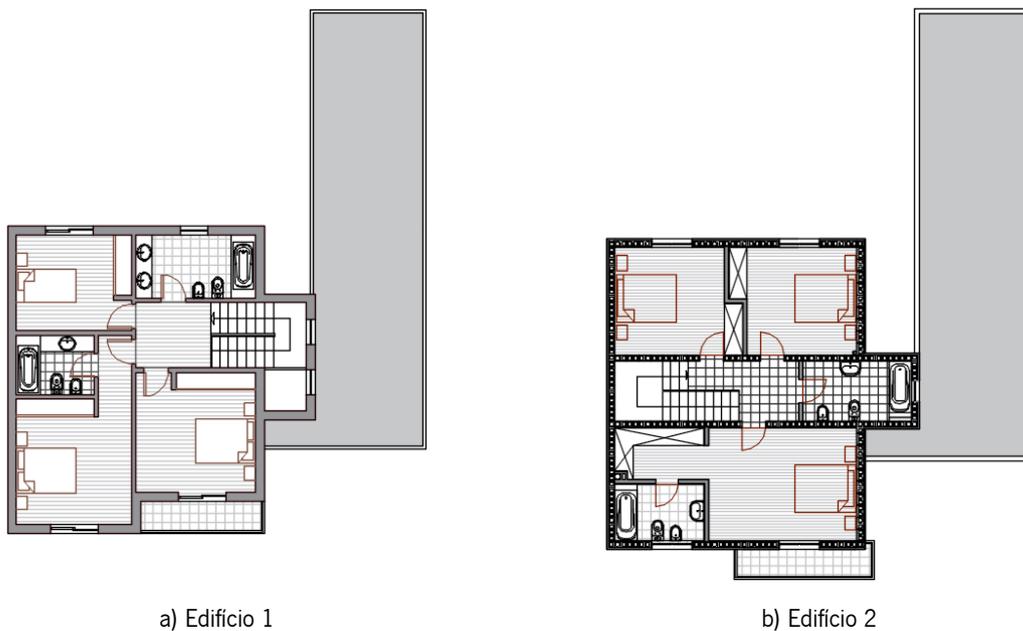


Figura 21 – Planta do andar dos edifícios

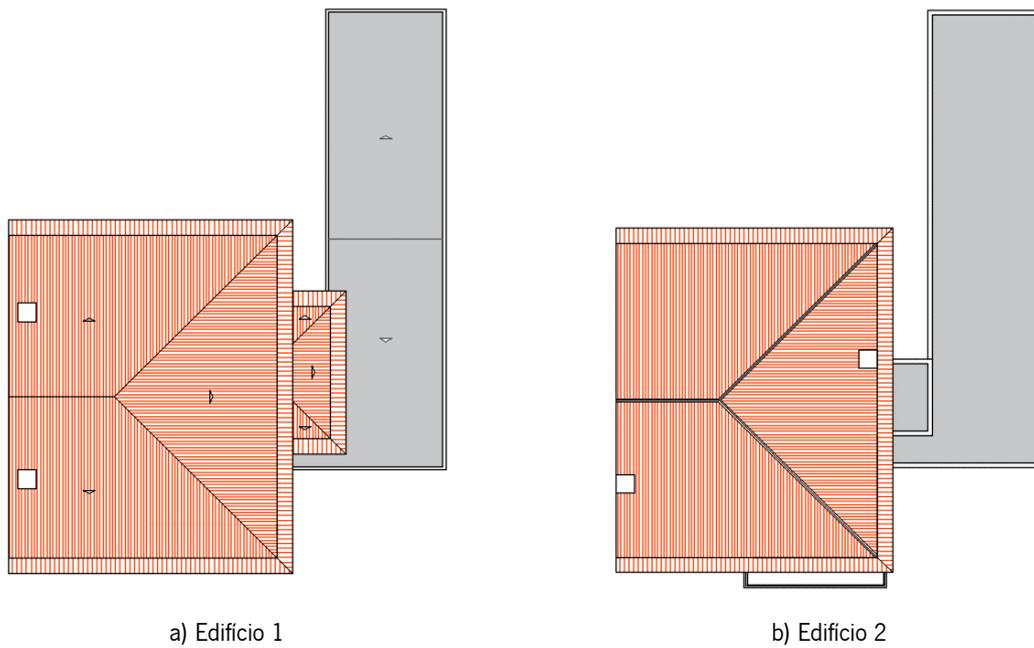


Figura 22 – Planta da cobertura dos edifícios

Contudo, foi construído apenas o edifício em alvenaria estrutural (Edifício 2), sendo apresentado entre a Figura 23 e 34 um levantamento fotográfico que cobre as várias fases da construção. Neste edifício foram utilizadas lajes de vigotas pré-fabricadas com abobadilhas de betão, escadas em betão armado, sendo as fundações contínuas para acompanhamento das paredes.



Figura 23 – Marcações da construção



Figura 24 – Abertura de fundações



Figura 25 – Colocação de armaduras nas sapatas



Figura 26 – Betonagem de fundação



Figura 27 – Início da execução de fiadas de bloco



Figura 28 – Nivelamento e alinhamento de fiadas



Figura 29 – Colocação de argamassa e armaduras de junta



Figura 30 – Colocação de bloco lintel



Figura 31 – Início da execução da laje



Figura 32 – Betonagem da laje



Figura 33 - Processo de execução das paredes



Figura 34 - Aspeto interior depois da betonagem da laje

4. METODOLOGIA

4.1. Avaliação da Sustentabilidade de Soluções para Paredes Exteriores

A análise de soluções construtivas foi desenvolvida com recurso à Metodologia de Avaliação Relativa de Sustentabilidade de Soluções Construtivas (MARS-SC). Esta propõe a avaliação de sustentabilidade de soluções construtivas através da sua comparação com a prática convencional - solução de referência - em cada um dos parâmetros das três dimensões de sustentabilidade: Ambiental, Funcional e Económica.

No presente estudo será aplicada a MARS-SC com o objetivo de comparar quantitativamente e graficamente o desempenho de cada uma das soluções ao nível dos parâmetros ambientais, funcionais e económicos seleccionados, podendo no final hierarquizar cada uma delas de acordo com a sua sustentabilidade. A metodologia desenvolve-se nas fases representadas na Figura 35.

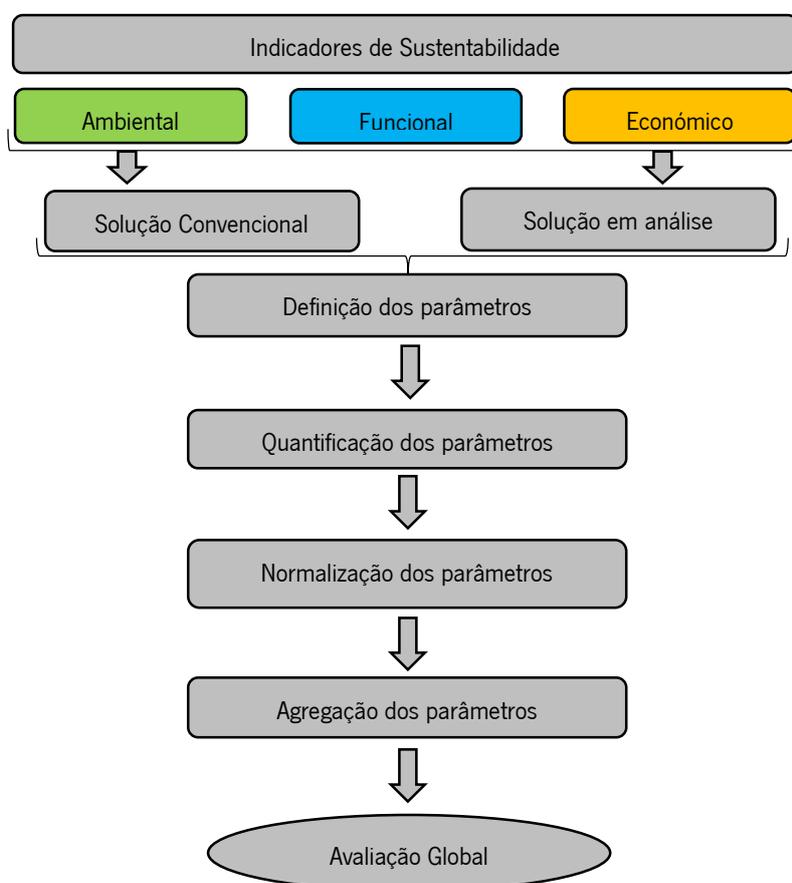


Figura 35 - Fases de aplicação da metodologia MARS-SC (Mateus, 2009)

4.1.1. Apresentação das soluções construtivas

Devido ao facto de ainda nos dias de hoje a estrutura em betão armado ter grande expressão nas construções em Portugal, foi considerada como referência a parede dupla de tijolo cerâmico, normalmente utilizada neste sistema construtivo.

A Parede 1 (Referência) é representada na Figura 36, sendo constituída por dois panos de alvenaria de tijolo cerâmico, sendo o exterior de 15 centímetros e o interior de 11 centímetros, com isolamento em EPS de 6 centímetros na caixa de ar e acabamento das duas faces com reboco tradicional de 1,5 centímetros e pintura, totalizando uma espessura de 37 centímetros.

Como o objetivo da análise é comparar elementos com a mesma unidade funcional, e tendo em conta que a parede de referência é a única não resistente, houve a necessidade de considerar uma quantidade de betão referente aos pilares, tendo por base um pórtico de 4m de vão, com dois pilares quadrados de 25 centímetros de lado.

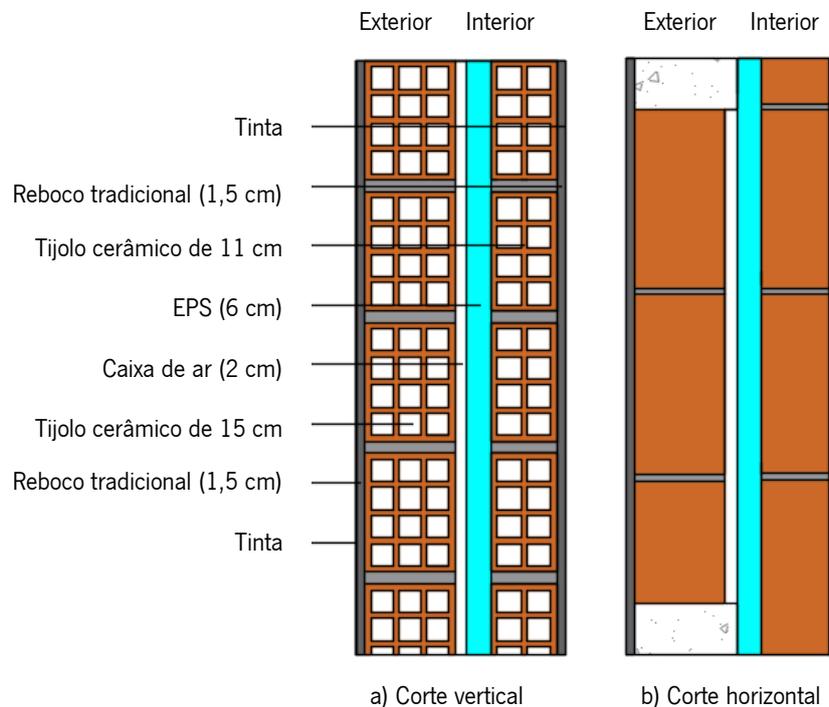


Figura 36 – Constituição da parede dupla de alvenaria de tijolo cerâmico (Parede 1)

Uma vez que a alvenaria estrutural é a base do estudo, a Parede 2, tal como indicado na Figura 37, é baseada na aplicação da alvenaria resistente com recurso ao Bloco BEST, sendo o acabamento interior em reboco tradicional de 1,5 centímetros e o exterior em ETICS, composto por isolamento em EPS de 6 centímetros e reboco armado de 0,5 centímetros, tendo uma espessura total de 28 centímetros.

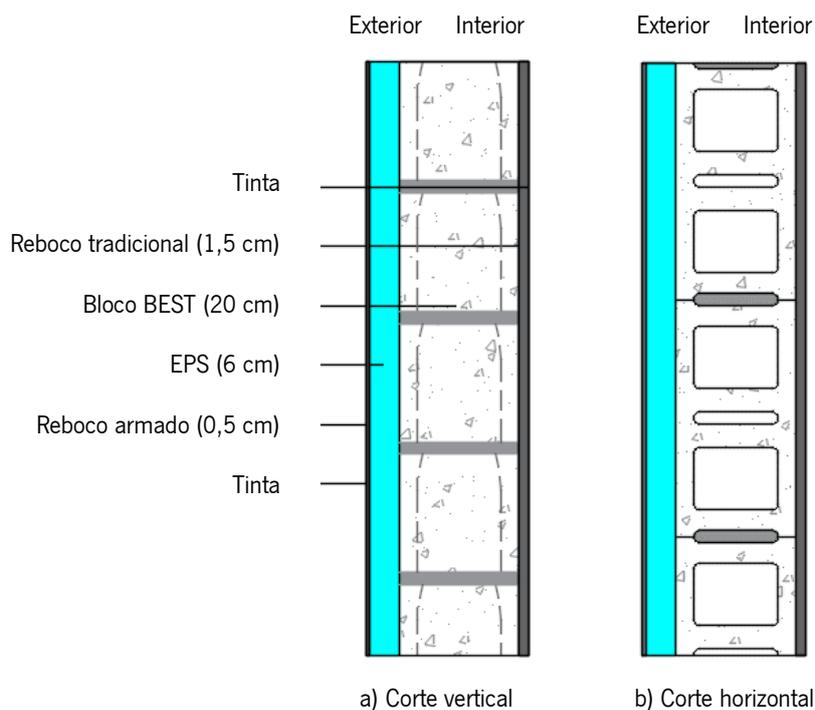


Figura 37 – Constituição da parede resistente com aplicação do Bloco BEST (Parede 2)

Na Parede 3 considerou-se a utilização do betão armado, por se tratar de um material muito utilizado na construção atual, apesar de não ser uma solução corrente em paredes exteriores de edifícios de habitação. Trata-se de uma parede resistente em betão armado de 20 centímetros de espessura, acabamento em reboco tradicional pelo interior (1,5 centímetros), sendo na outra face aplicado ETICS com as mesmas características da Parede 2. Tal como é possível verificar-se na Figura 38 a parede tem 28 centímetros de espessura.

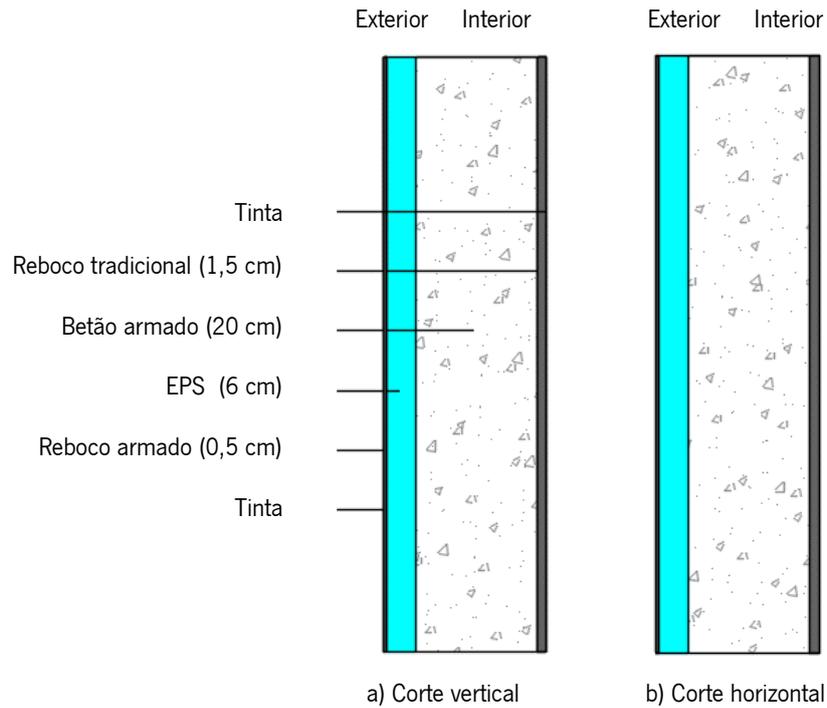


Figura 38 – Constituição da parede resistente em betão armado (Parede 3)

A solução apresentada como Parede 4 é baseada no sistema construtivo em aço leve (*Light steel framing*), sendo aplicados perfis em aço do tipo C150 com afastamento de 60 centímetros. Foi considerado o acabamento pelo interior em placas de gesso laminado de 1,5 centímetros, enquanto pelo exterior são aplicadas placas de OSB com o acabamento em ETICS com 6 centímetros de EPS e 0,5 centímetros de reboco armado. Tal como representado na Figura 39, no interior da parede é aplicada lã mineral a encher o espaço entre as placas, sendo das paredes analisadas a mais esbelta com apenas 24,1 centímetros.

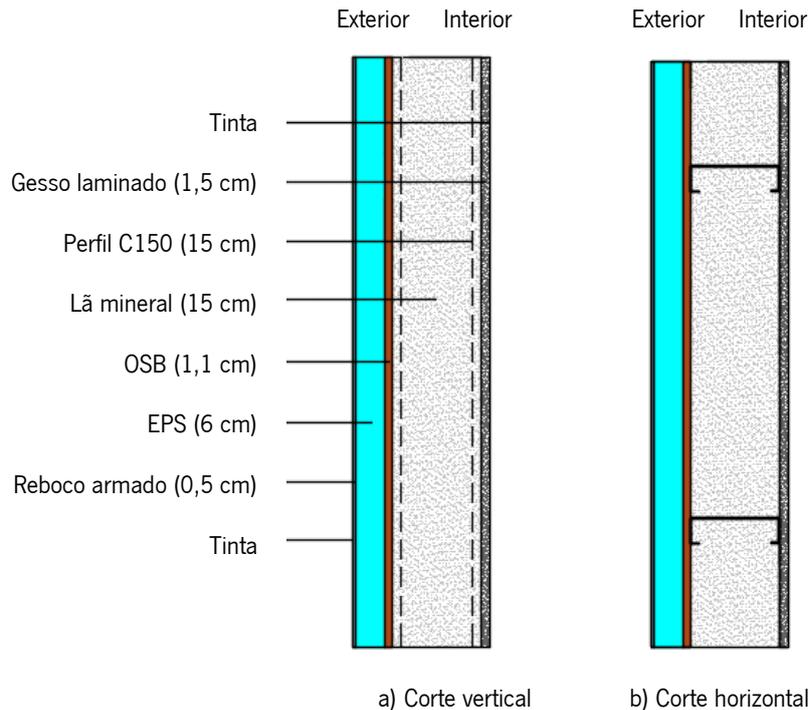


Figura 39 – Constituição da parede estrutural de aço leve (Parede 4)

4.1.2. Definição dos parâmetros

Nesta fase estabelecem-se e quantificam-se os parâmetros a analisar em cada indicador de sustentabilidade. Estes estão relacionados com as três dimensões de sustentabilidade, sendo analisados os que melhor exprimem o comportamento da solução, tendo em conta os objetivos da avaliação, as características das soluções e as exigências que estas devem satisfazer (Mateus e Bragança, 2006). No caso dos parâmetros funcionais os pesos não são consensuais, dependendo essencialmente do tipo de utilização da solução e do avaliador. Ao nível dos parâmetros ambientais já existem estudos que permitem a sua definição, como por exemplo os realizados pelo *United States Environmental Protection Agency* (USEPA) que apresentam uma lista de pesos tendo em conta os efeitos negativos que provocam sobre o ambiente. Para o presente trabalho foram considerados esses estudos, tendo os pesos considerados sido daí extrapolados.

Para a análise de cada uma das soluções construtivas foram consideradas as seis categorias de impacto ambiental e a dependência de energia renovável e não renovável de cada uma, tal como identificado na Tabela 4.

Tabela 4 – Indicadores de impacto ambiental considerados na base de dados de LCA

Impactes ambientais expressos em categorias de LCA
Potencial de diminuição das reservas de recursos abióticos (ADP)
Potencial de aquecimento global (GWP)
Potencial de destruição da camada de ozono (ODP)
Potencial de acidificação (AP)
Potencial de oxidação fotoquímica (POCP)
Potencial de eutrofização (EP)
Impactes ambientais não expressos em categorias de LCA
Energia não renovável incorporada (ENR)
Energia renovável incorporada (ER)

Por forma a compreender melhor a importância de cada um dos impactes, de seguida é apresentada uma pequena descrição de cada um.

- Potencial de diminuição das reservas de recursos abióticos (ADP) – Relacionada com a garantia do conforto e saúde humana e com a preservação dos ecossistemas, e tem como objetivo avaliar o problema da disponibilidade decrescente de recursos naturais;
- Potencial de aquecimento global (GWP) – Tem em conta a emissão de GEE para a atmosfera tendo em conta as propriedades radioativas tal como o tempo necessário para a remoção da substância na atmosfera.
- Potencial de destruição da camada de ozono (ODP) – Avalia o potencial de destruição da camada de ozono, o que fará com que aumente a quantidade de radiação ultravioleta a atingir a Terra, repercutindo-se negativamente na durabilidade dos materiais, na saúde dos seres vivos e no equilíbrio dos ecossistemas.
- Potencial de acidificação (AP) – O potencial de acidificação tem em conta a capacidade de conversão das emissões para o ar (principalmente amónia, dióxido de enxofre e óxido de azoto) em substâncias ácidas que serão transportadas pelo vento e depositadas como partículas ou chuva ácida.

- Potencial de oxidação fotoquímica (POCP) – A oxidação fotoquímica corresponde à formação de compostos químicos reativos devido à ação da radiação ultravioleta, causando problemas de saúde, diminuição de produtividade dos terrenos agrícolas, alterações na biodiversidade e vários problemas materiais.
- Potencial de eutrofização (EP) – A eutrofização inclui todos os impactos devido a níveis excessivos de emissões de nutrientes para o ar, água e solo, por exemplo através de fertilizantes. Posteriormente irão levar ao excessivo crescimento de plantas resultando na falta de oxigénio e conseqüente morte de espécies.
- Energia não renovável incorporada (ENR) – Este indicador exprime a dependência de energia não renovável incorporada num produto, ou seja, a sua contribuição para o esgotamento dos recursos não renováveis.
- Energia renovável incorporada (ER) – Ao contrário dos anteriores, este indicador não expressa um efeito negativo sobre o ambiente, mas apenas dá indicação acerca da preocupação em utilizar fontes renováveis em detrimento das não renováveis (Bragança e Mateus, 2011).

Contudo, e tal como referenciado na Tabela 5, no estudo apenas serão considerados os cinco parâmetros (GWP, ODP, AP, POCP e EP) contemplados na metodologia MARS-SC, tal como a energia não renovável que está relacionada com a dependência de combustíveis fósseis de cada uma das soluções. Relativamente ao desempenho funcional é analisado o conforto térmico através do coeficiente global de transmissão térmica (U) e o conforto acústico através do índice de redução sonora (Rw). Em termos económicos é analisado o custo de construção, que fica com a totalidade do peso do indicador.

Tabela 5 – Quantificação do peso das dimensões e dos parâmetros analisados

Indicador	Parâmetros avaliados	Peso (%)
Ambiental	Energia não renovável (ENR)	12
	Potencial de aquecimento global (GWP)	38
	Potencial de destruição da camada de ozono (ODP)	12
	Potencial de acidificação (AP)	12
	Potencial de oxidação fotoquímica (POCP)	14
	Potencial de eutrofização (EP)	12
Funcional	Coefficiente global de transmissão térmica (U)	75
	Índice de redução sonora (Rw)	25
Económico	Custo de Construção (CC)	100

4.1.3. Quantificação dos parâmetros

a. Indicador Ambiental

Depois de seleccionar os parâmetros a analisar é necessário proceder à quantificação de cada um deles tendo em conta todas as fases da vida útil a considerar. Para a obtenção destes valores poderá recorrer-se a bases de dados relativas a estudos realizados, programas informáticos ou especialistas.

O estudo dos efeitos negativos provocados por cada uma das soluções sobre o meio ambiente foi desenvolvido com recurso ao programa informático SimaPro v7.3.3 que converte os fluxos de materiais em impactes ambientais, tendo sido utilizado o método CML 2 baseline 2000 v2.05 para a quantificação do ADP, GWP, ODP, AP, POCP e EP e o método Cumulative energy demand v1.08 para a energia.

Para tal foi necessário proceder à quantificação da massa de cada material presente nas soluções, uma vez que quanto menor o peso de cada um dos materiais, menor será o seu impacte ambiental. Tendo isso em conta, é apresentado da Tabela 6 à 9 a massa de cada um dos materiais utilizados nas várias soluções.

Tabela 6 – Massa de cada um dos materiais constituintes da Parede 1 (referência)

Material		Quantidade		
		Unidades	Volume (m ³)	Massa (Kg/m ²)
1	Betão (pilares)	-	0,03	75,0
2	Tijolo cerâmico 11 cm	15,6	-	60,8
3	Tijolo cerâmico 15 cm	13	-	67,6
4	EPS	-	0,06	0,9
5	Argamassa de assentamento	-	0,04	78
6	Argamassa de reboco	-	0,03	58,5
7	Tinta	-	-	0,7
			Total	341,5

Tabela 7 - Massa de cada um dos materiais constituintes da Parede 2

Material		Quantidade		
		Unidades	Volume (m ³)	Massa (Kg/m ²)
8	Bloco BEST	11,9	-	160,7
9	EPS	-	0,06	0,9
10	Argamassa de assentamento	-	0,03	58,5
11	Argamassa de reboco	-	0,02	39,0
12	Tinta	-	-	0,7
			Total	259,8

Tabela 8 - Massa de cada um dos materiais constituintes da Parede 3

Material		Quantidade		
		Unidades	Volume (m ³)	Massa (Kg/m ²)
13	Betão	-	0,2	500,0
14	EPS	-	0,06	0,9
15	Argamassa de reboco	-	0,02	39,0
16	Tinta	-	-	0,7
			Total	540,6

Tabela 9 - Massa de cada um dos materiais constituintes da Parede 4

Material		Quantidade		
		Comprimento (m)	Volume (m ³)	Massa (Kg/m ²)
17	Gesso laminado	-	0,015	13,5
18	Perfil C150	2	-	6,4
19	Lã mineral	-	0,15	6
20	OSB	-	0,011	7,2
21	EPS	-	0,06	0,9
22	Argamassa de reboco	-	0,005	9,8
23	Tinta	-	-	0,7
			Total	44,5

Para além dos impactes incorporados em cada um dos materiais é necessário considerar todas as ações negativas para o meio ambiente, como por exemplo os impactes relativos ao transporte dos materiais entre ao local de produção e a obra, tal como no final da vida útil entre a obra e a empresa de receção dos resíduos da construção e demolição. No presente estudo, foi considerado que o transporte é feito em ambos os casos com recurso a um camião de grande tonelagem e uma distância de 50 Km entre a origem e a obra tal como entre a obra e o destino dos resíduos.

b. Indicador Funcional

Em termos funcionais há duas características essenciais no estudo de paredes para envolvente exterior de edifícios, que são o desempenho térmico e acústico da solução.

Neste trabalho o desempenho térmico foi estimado através do coeficiente global de transmissão térmica (U) que representa a quantidade de calor que atravessa a parede por unidade de tempo e superfície, quando sujeito a um gradiente unitário entre os ambientes que esta mesma parede separa. Esta característica tem grande importância não só devido à influência que tem em proporcionar conforto aos utilizadores dos edifícios, mas por outro lado porque está diretamente relacionada com o desempenho dos imóveis em todas as dimensões de Sustentabilidade. Desde logo porque quanto maior for o coeficiente global de transmissão térmica, maiores serão as

trocas de calor entre o exterior e o interior, levando ao aumento da dependência de energia para manter o conforto térmico da habitação, e conseqüente aumento dos custos relacionados com a aquisição da energia (Dimensão económica) tal como dos impactes sobre o meio ambiente (Dimensão ambiental).

O estudo do desempenho térmico de cada uma das paredes foi desenvolvido com base na regulamentação em vigor, o Decreto lei nº 118/2013 de 20 de Agosto (Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Habitação).

Assim sendo, e tendo definidos os materiais que integram cada uma das paredes exteriores, o coeficiente global de transmissão térmica (U) calcula-se de acordo com a equação 1.

$$U = \frac{1}{R_{si} + R_{se} + \sum R_j} \quad [1]$$

Onde R_{si} é a resistência superficial interior (m².°C/W), R_{se} é a resistência superficial exterior (m².°C/W) e R_j é a resistência térmica (m².°C/W) de cada um dos materiais constituintes da parede e da caixa de ar.

Tendo como base os valores apresentados pelo Despacho n.º 15793-K/2013 de 3 de Dezembro, as resistências superficiais e dos espaços de ar não ventilados são indicadas na Tabela 10 e 11, respetivamente.

Tabela 10 – Valores das resistências térmicas superficiais

Sentido do fluxo de calor	Resistência térmica (m ² .°C/W)	
	Interior (R _{si})	Exterior (R _{se})
Horizontal	0,13	0,04

Tabela 11 – Valores das resistências térmicas dos espaços de ar não ventilados

Direção e sentido do fluxo de calor	Espessura (mm)	R _{ar} (m ² .°C/W)
Horizontal	< 5	0,00
	5	0,11
	10	0,15
	15	0,17
	25 a 300	0,18

A resistência térmica (R) de cada um dos materiais utilizados está relacionada com a sua espessura e condutibilidade térmica (λ), pela equação 2.

$$R = \frac{esp}{\lambda} \quad [2]$$

Onde R é a resistência térmica ($m^2 \cdot ^\circ C/W$), esp é a espessura do material (m) e λ é a sua condutibilidade térmica ($W/m^2 \cdot ^\circ C$).

As características térmicas consideradas para cada um dos materiais utilizados são indicadas na Tabela 12, sendo que a resistência térmica do Bloco BEST foi obtido no relatório técnico do projeto Alvest (Projecto Alvest, 2013).

Tabela 12 – Caracterização térmica dos materiais

Material	λ ($W/m^2 \cdot ^\circ C$)	R ($m^2 \cdot ^\circ C/W$)
Aglomerado de fibras de madeira (OSB)	0,13	-
Argamassa de reboco	1,3	-
Betão armado	2	-
Bloco BEST	-	0,52
Gesso cartonado	0,25	-
Lã mineral	0,04	-
Poliestireno expandido (EPS)	0,04	-
Tijolo cerâmico 11	-	0,27
Tijolo cerâmico 15	-	0,39

O desempenho acústico é outro dos parâmetros funcionais a ter em conta para a escolha de uma solução construtiva, visto ser importante na garantia das condições de conforto dos edifícios. Para paredes exteriores importa ter em conta o índice de redução sonora (R_w), característica que está relacionada com a capacidade da parede em dissipar a energia sonora incidente. A transmissão sonora pode acontecer de forma direta, quando ocorre entre os elementos de separação ou de forma indireta quando é através de elementos adjacentes, mas no presente estudo, e como se tratam de paredes na zona corrente apenas serão consideradas

as transmissões diretas. Existem vários métodos para a sua quantificação, sendo que será utilizado o Modelo Misto proposto por Meisser (Meisser, 1973).

Este método desenvolve-se em várias fases, sendo que inicialmente é importante calcular o índice de redução sonora, característica esta que está diretamente relacionada com a massa da solução, uma vez que quanto maior for a massa, maior será sua capacidade de redução sonora – Lei da massa. Segundo esta lei, para um som de 500 Hz a redução sonora de uma solução pode ser expressa através da equação 3.

$$R_{500\text{Hz}} = 13,3 \log(m) + 13,4 \quad [3]$$

Onde m é a massa da solução (kg/m²).

Contudo, para soluções com massa superior a 200 Kg/m² o seu comportamento altera-se, podendo ser obtido através da equação 4.

$$R_{500\text{Hz}} = 14,3 \log(m) + 11,1 \quad [4]$$

No caso de se tratar de paredes duplas, para a mesma frequência esta característica acústica é obtida através das equações 3 e 4, somando a diferença de isolamento entre elementos simples e duplos com a mesma massa superficial total. Para as soluções com caixa de ar entre os 2 e 4 centímetros esta diferença é próxima dos 4 dB, podendo chegar aos 9 dB no caso de esta ser superior a 10 centímetros.

Ainda para os elementos duplos, como é o caso da Parede 1, é necessário fazer a verificação da frequência de ressonância (fr) do conjunto das massas e da caixa de ar através da equação 5.

$$fr = 84 \sqrt{\frac{1}{d} \left(\frac{1}{m_1} + \frac{1}{m_2} \right)} \quad [5]$$

Onde d é a largura da caixa de ar (m) e mi é a massa do pano i (Kg/m²).

Quando a frequência de ressonância é superior a 100 Hz deve proceder-se à correção da parede, podendo aumentar-se a largura da caixa de ar e/ou a massa de cada um dos panos que a constituem.

De seguida verifica-se a frequência crítica (f_c) de cada uma das paredes, sendo que esta característica está relacionada com o tipo de material constituinte do elemento de separação, e é calculado através da equação 6.

$$f_c = \frac{f_{c1cm}}{esp} \quad [6]$$

Onde f_c é a frequência crítica da parede (Hz), f_{c1cm} é a frequência crítica do elemento por cada centímetro de espessura (Hz) e esp é a espessura do elemento (cm).

Na Tabela 13 apresentam-se os valores referentes à frequência crítica de cada um dos materiais utilizados, tal como a quebra provocada pelo efeito de coincidência. No caso do Bloco BEST estas características foram consideradas equivalentes às de um bloco de betão não estrutural.

Tabela 13 – Frequência crítica e quebra e quebra por efeito de coincidência dos materiais

Material	Frequência crítica para 1 cm de espessura (Hz)	Quebra por efeito de coincidência (dB)
Betão	1800	8
Bloco BEST	3200	9
Gesso laminado	4000	7
Madeira	18000	6
Tijolo cerâmico	2000	9

Por último determina-se o índice de redução sonora (R_w) para cada uma das soluções recorrendo à comparação do traçado definido pelo índice de redução sonora com um traçado convencional de referência, de acordo com a metodologia referida na NP-2073.

Após o ajustamento das duas curvas, o valor do índice de isolamento corresponde ao valor que a curva de referência ajustada assume para a frequência de 500 Hz (Mateus, 2004).

c. Indicador Económico

A escolha dos sistemas construtivos a aplicar continua ainda a ser definida apenas pelo custo de construção, não tendo em conta os custos relacionados com o ciclo de vida nem os parâmetros relativos com a funcionalidade e os impactes que provoca sobre o meio ambiente. Contudo o custo de construção não deve por si só definir qual a melhor solução, uma vez que uma solução que permite uma poupança ligeira na construção pode exigir um maior custo de operação, ou vice versa.

Os valores apresentados no estudo representam os custos associados à construção de uma unidade de área de cada uma das soluções, isto devido à dificuldade em prever os valores relativos às restantes fases do ciclo de vida. Estes foram estimados através da média dos valores obtidos por consulta a três empresas de construção a nível nacional.

4.1.4. Normalização dos parâmetros

Esta fase tem dois objetivos, sendo que por um lado permite evitar os efeitos de escala na agregação dos parâmetros e, por outro lado, resolve o problema resultante de alguns indicadores serem melhores quanto maiores forem, e outros serem melhores quanto menores forem. Esta normalização torna os valores dos parâmetros adimensionais, convertendo-os numa escala entre 0 (pior valor) e 1 (melhor valor), sendo que para isso é aplicada a equação de Diaz-Balteiro indicada na equação 7.

$$\bar{P}_i = \frac{P_i - P_i^*}{P_i^* - P_i} \quad [7]$$

Onde P_i é o valor do parâmetro, P_i^* e P_i são o melhor e o pior valor do parâmetro de sustentabilidade das tecnologias analisadas.

4.1.5. Agregação dos parâmetros

A agregação dos parâmetros consiste em organizar dentro de cada indicador, os diversos parâmetros analisados em função da sua importância, isto é, de acordo com o seu peso. Assim, permite uma simplificação na compreensão do desempenho global de cada uma das soluções, ao contrário do que aconteceria no caso de ser apresentada uma listagem dos resultados obtidos ao nível de cada parâmetro analisado.

Tendo já quantificado todos os parâmetros e atribuído os respetivos pesos, o cálculo do desempenho parcial em cada indicador é efetuado pela equação 8.

$$I_j = \sum_{i=1}^n w_i \cdot \bar{P}_i \quad [8]$$

Onde o indicador I_j é o resultado da média ponderada do indicador, w_i é o peso do parâmetro e \bar{P}_i é a quantificação do parâmetro.

Assim sendo, para obter o desempenho parcial ao nível de cada indicador são aplicadas as equações 9 à 11. Na quantificação do indicador económico, e uma vez que se considerou apenas o custo de construção de cada solução, o desempenho económico assume o mesmo valor do parâmetro económico normalizado.

$$\text{Indicador ambiental} \quad I_A = \sum_{i=1}^n w_{Ai} \cdot \bar{P}_{Ai} \quad [9]$$

$$\text{Indicador funcional} \quad I_F = \sum_{i=1}^n w_{Fi} \cdot \bar{P}_{Fi} \quad [10]$$

$$\text{Indicador económico} \quad I_E = \bar{P}_E \quad [11]$$

4.1.6. Determinação do nível de sustentabilidade

Depois de avaliados todos os parâmetros e feita a sua agregação ao nível de cada indicador (Ambiental, Funcional e Económico) é realizada a avaliação da solução com o cálculo do seu desempenho global. Para tal é necessário atribuir o peso de cada um dos indicadores na nota global, sendo que este não é muito consensual, podendo fazer-se uma distribuição equitativa dos pesos pelos três indicadores. Contudo, e tendo em conta que a Construção Sustentável pretende compatibilizar as preocupações ambientais sem comprometer o bom desempenho funcional e por forma a que apresente um nível económico interessante, na aplicação desta metodologia adotaram-se os pesos indicados na Tabela 14.

Tabela 14 – Peso de cada indicador de Sustentabilidade no desempenho global (Mateus, 2009)

Indicador	Peso (%)
Ambiental	40
Funcional	30
Económico	30

Assim sendo a nota sustentável é obtida com a aplicação da equação 12, resultando num valor entre 0 e 1.

$$NS = w_{G1} \cdot I_A + w_{G2} \cdot I_F + w_{G3} \cdot I_E \quad [12]$$

Onde NS é a nota sustentável, w_G é o peso do indicador e o I é o valor de cada indicador.

Contudo é de salientar que nos resultados finais, a apresentação da nota sustentável deve ser acompanhada pelo desempenho da solução em cada um dos três indicadores, para uma melhor análise, uma vez que soluções com comportamentos muito diferentes em cada indicador poderão resultar num desempenho global equivalente, devido à compensação entre os indicadores.

Assim sendo, o valor obtido permite comparar qualitativamente cada uma das notas sustentáveis das soluções analisadas (NS) com a nota obtida na solução de referência (NS_{ref}) de acordo com a Tabela 15.

Tabela 15 – Avaliação de desempenho relativamente à solução de referência

Nota sustentável	Classificação do desempenho
$< NS_{ref}$	Inferior
$= NS_{ref}$	Referência
$> NS_{ref}$	Superior

4.1.7. Perfil sustentável

A última fase de aplicação da MARS-SC é a representação gráfica do desempenho normalizado das soluções em cada um dos parâmetros analisados, simplificando a interpretação e a perceção dos parâmetros em que uma solução é melhor que a outra. Esta representação é feita através de um gráfico do tipo radar, sendo que quanto mais próximo do centro (0) se encontrar o valor do parâmetro, pior é o seu desempenho.

Nas Figuras 40 e 41 são apresentados dois exemplos em que facilmente se identifica que no primeiro caso a solução em estudo (linha contínua) apresenta um desempenho melhor em todos os parâmetros que a solução de referência (linha a tracejado), sendo que no segundo caso verifica-se o contrário.

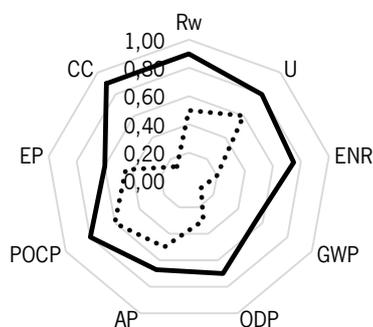


Figura 40 – Perfil sustentável onde a solução em estudo apresenta melhor desempenho

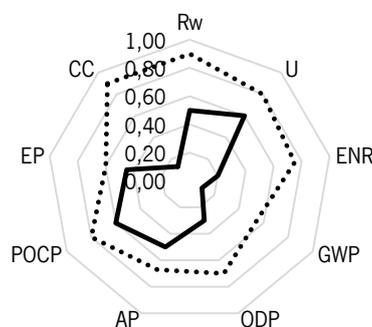


Figura 41 - Perfil sustentável onde a solução em estudo apresenta pior desempenho

4.2. Análise do Desempenho de Moradias Unifamiliares

Este estudo é desenvolvido com recurso à Avaliação de Ciclo de Vida (LCA) que é a compilação e avaliação das entradas, saídas e dos impactes ambientais de produtos ao longo das várias fases (produção, transporte, utilização, manutenção e destino final) do seu ciclo de vida, incluindo a matéria prima necessária para a sua produção. Com base nestes dados são avaliados os efeitos negativos provocados sobre os recursos naturais, o ambiente e a saúde humana.

A Figura 42 ilustra os possíveis estágios de ciclo de vida que podem ser considerados numa Avaliação de Ciclo de Vida e as possíveis entradas e saídas (USEPA, 2001).

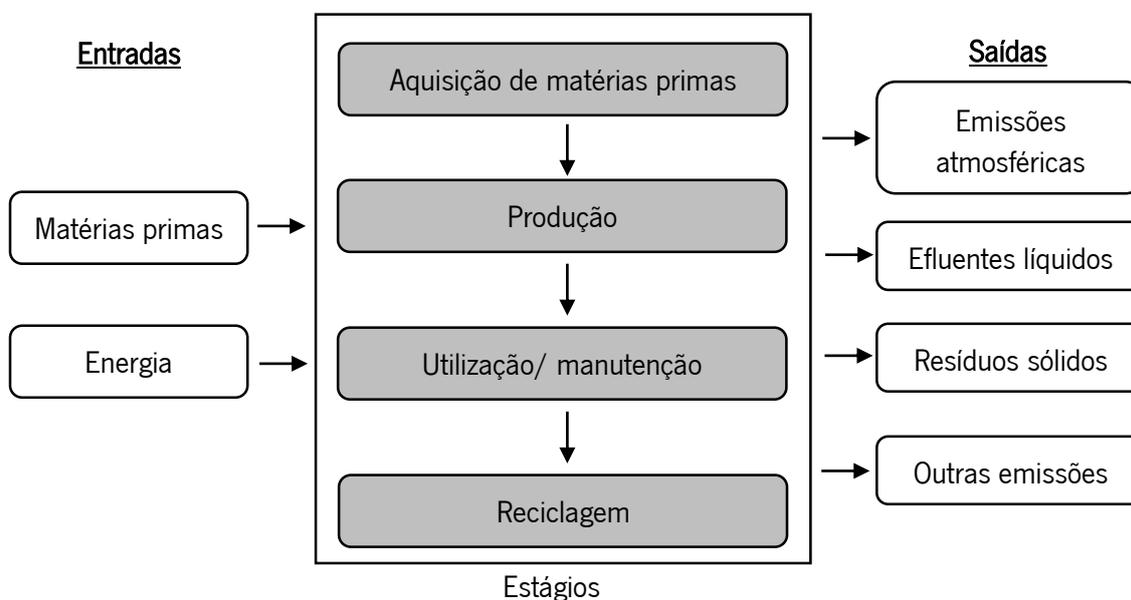


Figura 42 - Estágios do ciclo de vida (USEPA, 2001)

O processo de Avaliação de Ciclo de Vida é uma abordagem sistemática composta por quatro fases principais, sendo elas a definição de objetivos e âmbito, inventário de ciclo de vida, avaliação de impacto e interpretação dos resultados, como ilustra a Figura 43 (ISO 14040, 1997).

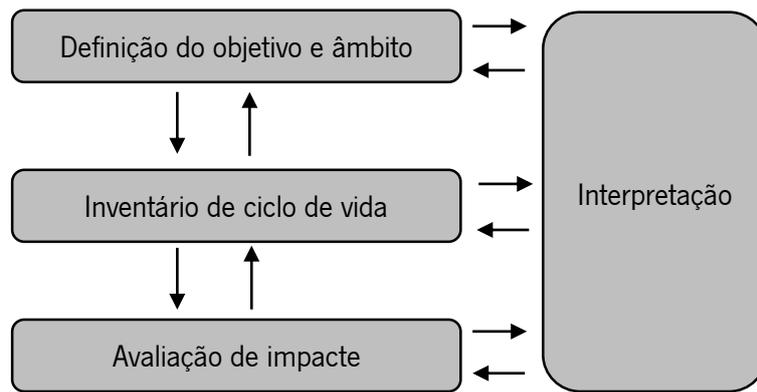


Figura 43 – Fases de uma análise de Ciclo de Vida (ISO 14040, 1997)

4.2.1. Definição do objetivo e âmbito

A avaliação do ciclo de vida surge na continuidade dos estudos desenvolvidos no referido projeto de desenvolvimento do Bloco BEST que deram principal enfoque às características económicas e funcionais da alvenaria estrutural. Assim, este tem como principal objetivo a análise e comparação do seu desempenho nas três dimensões de Sustentabilidade, relativamente ao betão armado.

Tendo como base os edifícios projetados, e devido a diferenças ao nível de materiais aplicados em cada um dos imóveis foi necessário considerar algumas alterações no presente estudo. Desde logo tinha sido projetada a aplicação de estores numa das soluções e portadas na outra, sendo que foi considerada a utilização de estores nos dois edifícios principalmente devido às diferenças térmicas proporcionadas por cada uma das soluções. Ao nível dos acabamentos interiores no Edifício 1 estava projetada a utilização de reboco tradicional (exceto nas casas de banho), sendo que na solução em estudo era aplicado gesso laminado em paredes e tetos (teto falso com 33cm de caixa de ar), pelo que houve a necessidade de uniformizar as duas soluções para reboco tradicional ficando os dois imóveis com um pé direito médio de 2,6m.

4.2.2. Inventário de ciclo de vida

Depois de definido o âmbito e objetivos do estudo procede-se ao inventário do ciclo de vida dos casos de estudo, que se trata da identificação e quantificação de todos os materiais e energia utilizados em cada um dos edifícios durante todas as fases do ciclo de vida – Construção, Utilização e Demolição/Desconstrução.

Para a quantificação dos materiais aplicados nos edifícios em estudo foram consideradas as massas indicadas na Tabela 16.

Tabela 16 – Massa considerada para cada um dos materiais.

Material	Massa			
	Kg/unidade	Kg/m	Kg/m ²	Kg/m ³
Abobadilhas betão	8,5	-	-	-
Aço	-	-	-	7800
Acabamentos cerâmicos	-	-	18,5	-
Alumínio	-	-	-	2700
Argamassa de assentamento	-	-	-	1950
Argamassa de reboco	-	-	-	1950
Argamassa ETICS	-	-	-	1950
Betão	-	-	-	2400
Bloco BEST	13,5	-	-	-
Granito	-	-	-	2800
Lintéis de betão	-	25	-	-
Pavimentos de madeira	-	-	13	-
EPS	-	-	-	15
XPS	-	-	-	35
Portas de madeira	-	-	32,5	-
Ripado	-	2,3	-	-
Telhas	3,4	-	-	-
Tijolo 11	3,9	-	-	-
Tijolo 15	5,2	-	-	-
Tinta	-	-	0,33	-
Vidro	-	-	-	2600
Vigotas	-	19	-	-

4.2.3. Avaliação dos impactes de ciclo de vida

A avaliação de impactes foi considerada para o estudo em questão, como o processo de quantificação dos efeitos associados a cada uma das dimensões de sustentabilidade resultantes da construção, utilização e demolição.

a. Indicador Funcional

Iniciou-se com o estudo da dimensão funcional uma vez que esta influencia o desempenho na dimensão ambiental devido aos impactes provocados pela energia necessária para manter as condições de conforto térmico, e ao nível económico devido aos custos associados a essa energia. O estudo de desempenho funcional teve em conta as características térmicas de cada um dos imóveis, sendo que foi desenvolvido de acordo com o Decreto lei nº 80/2006 de 4 de Abril (Regulamento das Características do Comportamento Térmico dos Edifícios), regulamentação em vigor aquando do desenvolvimento do Projeto de térmica de cada um dos edifícios. O cálculo foi efetuado com o apoio da folha de cálculo automático de aplicação do regulamento, sendo que para tal foi necessário ter como base os projetos de especialidades por forma a identificar várias características importantes relativas aos imóveis e à sua localização.

b. Indicador Ambiental

A avaliação da dimensão ambiental tem por base o inventário de ciclo de vida de todos os materiais e energia utilizados nas várias fases da vida útil dos edifícios.

Neste estudo foram contemplados os seis parâmetros ambientais anteriormente identificados na Tabela 3, tal como os dois parâmetros energéticos, sendo que para a sua quantificação foi utilizado o programa informático SimaPro v7.3.3, tendo sido empregue o método CML 2 baseline 2000 v2.05 para a quantificação do ADP, GWP, ODP, AP, POCP e EP e o método Cumulative energy demand v1.08 para a energia.

Na contabilização dos impactes ambientais foi considerada a análise do tipo *cradle-to-grave* (“do berço ao túmulo”) tendo sido considerada a totalidade do ciclo de vida dos materiais, desde a extração das matérias-primas até à sua deposição.

Foi necessário para a fase de construção definir a proveniência de cada um dos materiais, tendo em conta a distância e o tipo de veículo utilizado no seu transporte entre a fábrica e a obra. Posteriormente, na fase de manutenção definiu-se a proveniência dos materiais a aplicar tal como o destino dos materiais substituídos, contabilizando para além da distância e do tipo de veículo utilizado, a percentagem de material que é recuperado. O fim da vida útil do edifício também é responsável por impactes para o ambiente devido à necessidade de deposição de todos os materiais utilizados.

Para além dos efeitos negativos provocados pelos materiais também se consideraram os que são provocados pela dependência energética durante a fase de operação de cada um dos imóveis. Assim, foi considerado que para o aquecimento e arrefecimento dos edifícios é utilizada a energia elétrica, enquanto para as águas quentes e sanitárias recorre-se a combustível gasoso.

c. Indicador Económico

Na dimensão económica são contabilizados os custos associados a cada uma das fases do ciclo de vida dos imóveis, estando incluído o Imposto de Valor Acrescentado (IVA). Os valores considerados foram obtidos com recurso a um estudo por empresas sediadas na zona de construção, especializadas na construção de edifícios de habitação unifamiliares. Nos valores indicados para a fase de construção inclui-se apenas a construção dos imóveis, não estando contemplada a instalação de infra estruturas (hidráulicas e elétricas), uma vez que estes não apresentam diferenças significativas em cada um dos sistemas construtivos.

Posteriormente é necessário ter em conta os gastos na fase de utilização, que estão relacionados com a manutenção e a operação de cada uma das habitações. Inicialmente, foi necessário programar a manutenção de cada um dos imóveis, sendo que os valores indicados contemplam os custos associados à mão-de-obra, equipamentos e materiais necessários para a substituição dos materiais definidos tal como os custos associados ao transporte e deposição em aterro pré-definido. A fase de operação também acarreta exigências económicas que estão diretamente relacionadas com o custo de energia necessário para manter o conforto térmico no

interior dos edifícios. Assim, e tendo como base as necessidades nominais para aquecimento e arrefecimento obtidas no estudo térmico, utilizaram-se na quantificação dos custos os valores apresentados pela Entidade Reguladora dos Serviços Energéticos (ERSE), que indica que para uma potência inferior a 6,9 kVA e com a tarifa simples, a energia elétrica fica a 0,1587 euros/kWh acrescido do IVA. Para as necessidades energéticas para preparação de águas quentes e sanitárias foi considerada a utilização de um esquentador a combustível gasoso, que tem um poder calorífico de 12,53 kWh/Kg. Tendo em conta que cada botija de 13 Kg tem um custo médio de 24,71 euros, foi considerado que o custo final é de 0,152 euros/kWh.

Por último é necessário quantificar os encargos económicos com o fim da vida útil dos edifícios, que têm em conta todos os equipamentos e mão-de-obra necessários para a demolição de cada um dos edifícios, tal como os custos associados ao transporte e à deposição em vazadouro de todos os materiais.

5. ANÁLISE DO CASO DE ESTUDO

5.1. Soluções de Paredes Exteriores

Neste capítulo será desenvolvida a avaliação e comparação de sustentabilidade dos sistemas construtivos em alvenaria estrutural relativamente à solução convencional e a uma solução em betão armado e em estrutura de aço leve, ao nível da zona corrente de parede. Esta servirá de base ao estudo desenvolvido no capítulo seguinte, uma vez que os sistemas construtivos são baseados na utilização do mesmo tipo de alvenarias, havendo apenas a diferença ao nível da abrangência da análise.

5.1.1. Quantificação dos parâmetros

a. Indicador Ambiental

Tendo em conta as quantidades de materiais utilizadas em cada uma das soluções de paredes exteriores, foram estudados os impactes associados às várias fases de vida de cada um dos materiais aplicados. Da Tabela 17 à 24 são indicados os impactes incorporados em cada um dos materiais (designação no capítulo 4.1.3), seguidos dos impactes relativos à sua produção, transporte e deposição.

Tabela 17 – Impactes associados a cada um dos materiais utilizados na Parede 1 (referência)

Material	Categoria de Impacte Ambiental						Energia	
	ADP (Kg Sb eq)	GWP (Kg CO ₂ eq)	ODP (Kg CFC-11 eq)	AP (Kg SO ₂ eq)	POCP (Kg C ₂ H ₄ eq)	EP (Kg PO ₄ eq)	ENR (MJ eq)	ER (MJ eq)
1	1,71E-02	7,83E+00	2,62E-07	1,32E-02	4,84E-04	3,26E-03	4,11E+01	2,41E+00
2	7,16E-02	1,45E+01	9,61E-07	3,32E-02	2,42E-03	1,04E-02	1,56E+02	1,56E+01
3	7,96E-02	1,61E+01	1,07E-06	3,69E-02	2,69E-03	1,16E-02	1,74E+02	1,73E+01
4	4,17E-02	3,73E+00	9,99E-08	1,34E-02	6,08E-03	2,35E-03	9,45E+01	9,07E-01
5	1,95E-02	9,91E+00	2,91E-07	1,48E-02	5,38E-04	3,36E-03	4,11E+01	2,41E+00
6	1,74E-02	8,89E+00	2,59E-07	1,32E-02	4,80E-04	2,98E-03	4,00E+01	2,14E+00
7	1,67E-02	1,91E+00	2,62E-07	1,15E-02	5,40E-04	4,15E-03	3,75E+01	2,82E+00
Total	2,64E-01	6,29E+01	3,20E-06	1,36E-01	1,32E-02	3,81E-02	5,84E+02	4,35E+01

Tabela 18 – Impactes associados a cada fase dos materiais utilizados na Parede 1 (referência)

	Categoria de Impacte Ambiental						Energia	
	ADP (Kg Sb eq)	GWP (Kg CO ₂ eq)	ODP (Kg CFC-11 eq)	AP (Kg SO ₂ eq)	POCP (Kg C ₂ H ₄ eq)	EP (Kg PO ₄ eq)	ENR (MJ eq)	ER (MJ eq)
Materiais	2,64E-01	6,29E+01	3,20E-06	1,36E-01	1,32E-02	3,81E-02	5,84E+02	4,35E+01
Transporte	2,00E-02	2,82E+00	4,45E-07	1,08E-02	3,44E-04	2,86E-03	4,65E+01	6,03E-01
Deposição	9,85E-03	1,26E+00	2,25E-07	5,21E-03	1,71E-04	1,35E-03	2,28E+01	2,67E-01
Total	2,93E-01	6,70E+01	3,87E-06	1,52E-01	1,37E-02	4,23E-02	6,54E+02	4,44E+01

Tabela 19 - Impactes associados a cada um dos materiais utilizados na Parede 2

Material	Categoria de Impacte Ambiental						Energia	
	ADP (Kg Sb eq)	GWP (Kg CO ₂ eq)	ODP (Kg CFC-11 eq)	AP (Kg SO ₂ eq)	POCP (Kg C ₂ H ₄ eq)	EP (Kg PO ₄ eq)	ENR (MJ eq)	ER (MJ eq)
8	5,19E-02	1,95E+01	7,04E-07	3,91E-02	1,69E-03	1,28E-02	1,22E+02	1,17E+01
9	4,17E-02	3,73E+00	9,99E-08	1,34E-02	6,08E-03	2,35E-03	9,45E+01	9,07E-01
10	1,46E-02	7,43E+00	2,18E-07	1,11E-02	4,04E-04	2,52E-03	3,36E+01	1,79E+00
11	1,16E-02	5,92E+00	1,72E-07	8,79E-03	3,20E-04	1,99E-03	2,66E+01	1,43E+00
12	1,67E-02	1,91E+00	2,62E-07	1,15E-02	5,40E-04	4,15E-03	3,75E+01	2,82E+00
Total	1,37E-01	3,85E+01	1,46E-06	8,39E-02	9,03E-03	2,38E-02	3,14E+02	1,87E+01

Tabela 20 - Impactes associados a cada fase dos materiais utilizados na Parede 2

	Categoria de Impacte Ambiental						Energia	
	ADP (Kg Sb eq)	GWP (Kg CO ₂ eq)	ODP (Kg CFC-11 eq)	AP (Kg SO ₂ eq)	POCP (Kg C ₂ H ₄ eq)	EP (Kg PO ₄ eq)	ENR (MJ eq)	ER (MJ eq)
Materiais	1,37E-01	3,85E+01	1,46E-06	8,39E-02	9,03E-03	2,38E-02	3,14E+02	1,87E+01
Transporte	1,52E-02	2,14E+00	3,39E-07	8,23E-03	2,62E-04	2,17E-03	3,54E+01	4,59E-01
Deposição	1,23E-02	1,57E+00	2,81E-07	6,51E-03	2,14E-04	1,69E-03	2,85E+01	3,33E-01
Total	1,64E-01	4,22E+01	2,08E-06	9,86E-02	9,51E-03	2,77E-02	3,78E+02	1,95E+01

Tabela 21 - Impactes associados a cada um dos materiais utilizados na Parede 3

Material	Categoria de Impacte Ambiental						Energia	
	ADP (Kg Sb eq)	GWP (Kg CO ₂ eq)	ODP (Kg CFC-11 eq)	AP (Kg SO ₂ eq)	POCP (Kg C ₂ H ₄ eq)	EP (Kg PO ₄ eq)	ENR (MJ eq)	ER (MJ eq)
13	1,14E-01	5,22E+01	1,74E-06	8,80E-02	3,23E-03	2,17E-02	2,74E+02	1,61E+01
14	4,17E-02	3,73E+00	9,99E-08	1,34E-02	6,08E-03	2,35E-03	9,45E+01	9,07E-01
15	1,16E-02	5,92E+00	1,72E-07	8,79E-03	3,20E-04	1,99E-03	2,66E+01	1,43E+00
16	1,67E-02	1,91E+00	2,62E-07	1,15E-02	5,40E-04	4,15E-03	3,75E+01	2,82E+00
Total	1,84E-01	6,38E+01	2,27E-06	1,22E-01	1,02E-02	3,02E-02	4,32E+02	2,13E+01

Tabela 22 - Impactes associados a cada fase dos materiais utilizados na Parede 3

	Categoria de Impacte Ambiental						Energia	
	ADP (Kg Sb eq)	GWP (Kg CO ₂ eq)	ODP (Kg CFC-11 eq)	AP (Kg SO ₂ eq)	POCP (Kg C ₂ H ₄ eq)	EP (Kg PO ₄ eq)	ENR (MJ eq)	ER (MJ eq)
Materiais	1,84E-01	6,38E+01	2,27E-06	1,22E-01	1,02E-02	3,02E-02	4,32E+02	2,13E+01
Transporte	3,17E-02	4,46E+00	7,05E-07	1,71E-02	5,45E-04	4,52E-03	7,37E+01	9,54E-01
Deposição	1,21E-04	1,55E-02	2,77E-09	6,42E-05	2,11E-06	1,67E-05	2,81E-01	3,30E-03
Total	2,16E-01	6,82E+01	2,98E-06	1,39E-01	1,07E-02	3,47E-02	5,06E+02	2,22E+01

Tabela 23 - Impactes associados a cada um dos materiais utilizados na Parede 4

Material	Categoria de Impacte Ambiental						Energia	
	ADP (Kg Sb eq)	GWP (Kg CO ₂ eq)	ODP (Kg CFC-11 eq)	AP (Kg SO ₂ eq)	POCP (Kg C ₂ H ₄ eq)	EP (Kg PO ₄ eq)	ENR (MJ eq)	ER (MJ eq)
17	3,34E-02	4,77E+00	5,27E-07	1,48E-02	6,33E-04	6,72E-03	7,75E+01	4,35E+00
18	1,11E-01	1,33E+01	3,53E-07	5,30E-02	7,58E-03	3,13E-02	1,87E+02	1,18E+01
19	3,67E-02	6,73E+00	3,24E-07	4,96E-02	1,80E-03	5,08E-03	8,61E+01	3,65E+00
20	3,78E-02	3,42E+00	1,60E-07	1,46E-02	2,15E-03	6,55E-03	8,94E+01	1,48E+02
21	4,17E-02	3,73E+00	9,99E-08	1,34E-02	6,08E-03	2,35E-03	9,45E+01	9,07E-01
22	2,90E-03	1,48E+00	4,31E-08	2,20E-03	8,00E-05	4,97E-04	6,66E+00	3,57E-01
23	1,67E-02	1,91E+00	2,62E-07	1,15E-02	5,40E-04	4,15E-03	3,75E+01	2,82E+00
Total	2,80E-01	3,53E+01	1,77E-06	1,59E-01	1,89E-02	5,66E-02	5,78E+02	1,72E+02

Tabela 24 - Impactes associados a cada fase dos materiais utilizados na Parede 4

	Categoria de Impacte Ambiental						Energia	
	ADP (Kg Sb eq)	GWP (Kg CO ₂ eq)	ODP (Kg CFC-11 eq)	AP (Kg SO ₂ eq)	POCP (Kg C ₂ H ₄ eq)	EP (Kg PO ₄ eq)	ENR (MJ eq)	ER (MJ eq)
Materiais	2,80E-01	3,53E+01	1,77E-06	1,59E-01	1,89E-02	5,66E-02	5,78E+02	1,72E+02
Transporte	2,61E-03	3,67E-01	5,79E-08	1,41E-03	4,48E-05	3,71E-04	6,06E+00	7,84E-02
Deposição	2,02E-03	2,63E-01	4,58E-08	1,07E-03	3,51E-05	2,80E-04	4,69E+00	5,61E-02
Total	2,85E-01	3,60E+01	1,87E-06	1,62E-01	1,89E-02	5,73E-02	5,89E+02	1,72E+02

Para uma melhor análise e comparação dos valores obtidos, apresenta-se da Figura 44 à 49 a representação gráfica de cada uma das categorias de impacte ambiental analisadas.

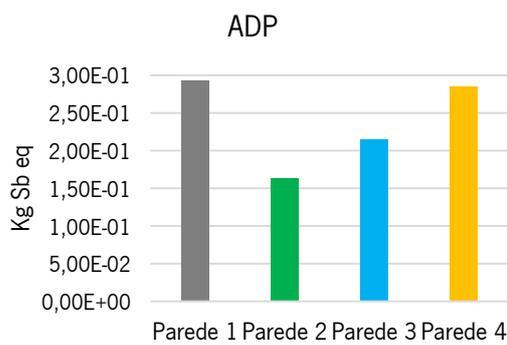


Figura 44 – Comparação do ADP de cada parede

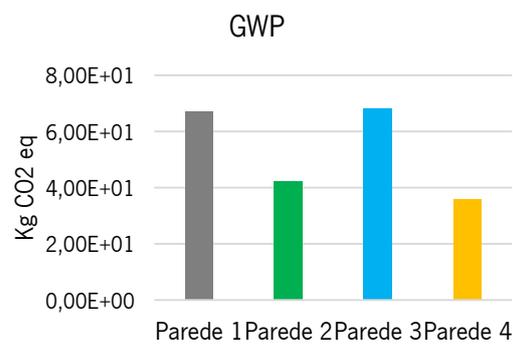


Figura 45 – Comparação do GWP de cada parede

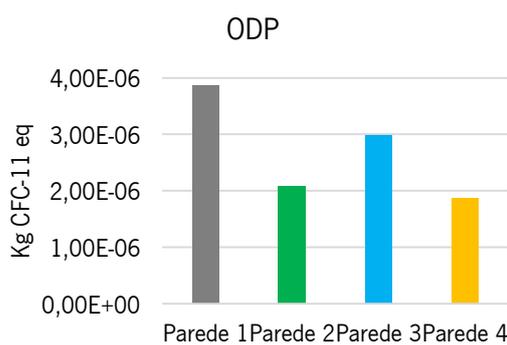


Figura 46 – Comparação do ODP de cada parede

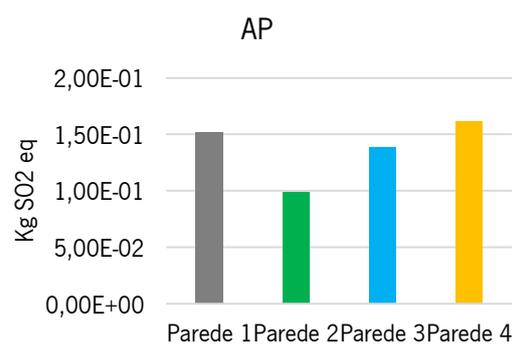


Figura 47 – Comparação do AP de cada parede

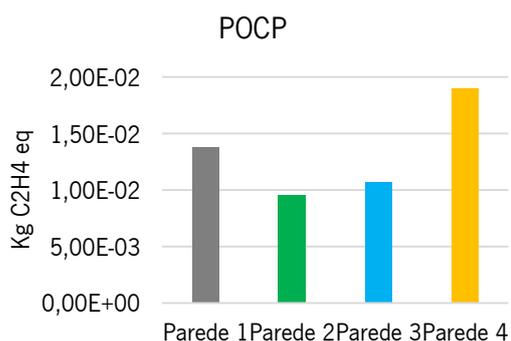


Figura 48 – Comparação do POCP de cada parede

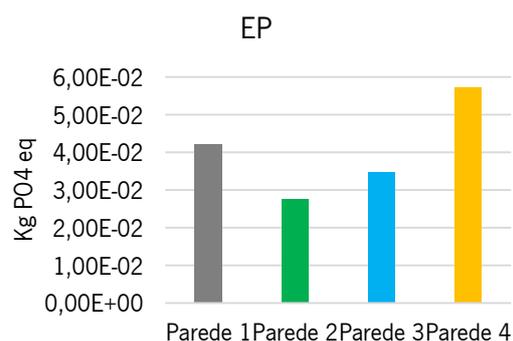


Figura 49 – Comparação do EP de cada parede

Desde logo é possível verificar que a Parede 2 (alvenaria estrutural com Bloco BEST) é a que apresenta menores impactos relativamente a quatro das categorias analisadas, sendo que mesmo no GWP e no ODP a diferença para a melhor solução (Parede 4) é pouco significativa. No caso do ADP, AP, POCP e EP destacam-se pela negativa as Paredes 1 e 4, enquanto no GWP e ODP as soluções 1 e 3 são as que apresentam maiores impactos sobre o meio ambiente.

b. Indicador Funcional

No indicador funcional foi analisado o comportamento térmico e acústico de cada uma das soluções. Em termos térmicos foi estudado o coeficiente global de transmissão térmica (U), sendo apresentada no Anexo 1 a caracterização térmica de cada um dos materiais utilizados, e na Tabela 25 o valor final de cada solução para este parâmetro funcional.

Tabela 25 – Coeficiente de transmissão térmica global (U) das paredes em estudo

	U (W/m ² .°C)
Parede 1 (ref.)	0,40
Parede 2	0,45
Parede 3	0,56
Parede 4	0,18

Analisando o valor obtido para cada uma das soluções verifica-se que cumprem com os limites impostos pela regulamentação em vigor (Decreto Lei n.º 118/2013 de 20 de Agosto).

Apesar da Parede 4 ser a que apresenta o melhor coeficiente de transmissão térmica global (U), no caso de esta ser aplicada ao nível do edifício é necessário analisar outros fatores por forma a verificar se continua a ser a melhor solução. Desde logo o seu comportamento pode piorar devido à inércia térmica, que representa a capacidade que um edifício tem em acumular calor nos seus elementos construtivos e libertá-lo posteriormente. Visto que é uma solução com uma massa bastante inferior às restantes, a sua contribuição para a inércia térmica será diminuta, o que fará com que o edifício onde a solução seja aplicada tenha pouca capacidade para acumular calor e manter o ambiente interior com uma temperatura estável durante mais tempo.

Ao nível do desempenho acústico estando a analisar a zona corrente de paredes exteriores importa perceber o índice de redução acústica de cada uma das soluções. O processo utilizado no cálculo é indicado no Anexo 2, sendo apresentados os valores finais na Tabela 26.

Tabela 26 – Caracterização acústica de cada uma das paredes

Parede	Massa (Kg/m ²)	Rw (dB)
1 (ref.)	341,5	53
2	259,8	49
3	540,6	56
4	44,5	45

Verifica-se que todos os valores cumprem com os limites mínimos exigidos pelo Decreto Lei n.º 96/2008, de 9 de Junho (RRAE).

c. Indicador Económico

Os custos associados à construção de cada uma das paredes analisadas é apresentado na Tabela 27, sendo possível verificar que a parede de referência (Parede 1) é a que tem o custo mais baixo estando em situação oposta a Parede 4, com uma diferença de 66 euros.

Tabela 27 – Custo de construção para cada parede

Parede	Custo de construção (euros/ m ²)
1 (ref.)	90
2	96
3	160
4	156

5.1.2. Normalização dos parâmetros

Depois de quantificados os parâmetros procedeu-se à sua normalização, obtendo valores entre 0 (pior) e 1 (melhor). Na Tabela 28 estão apresentados os valores de cada parâmetro referentes a cada uma das paredes.

Tabela 28 – Valor normalizado dos parâmetros

Indicador	Parâmetro	Valor			
		Parede 1	Parede 2	Parede 3	Parede 4
Ambiental	ENR	0,00	1,00	0,53	0,23
	GWP	0,04	0,81	0,00	1,00
	ODP	0,00	0,90	0,45	1,00
	AP	0,15	1,00	0,36	0,00
	POCP	0,55	1,00	0,87	0,00
	EP	0,51	1,00	0,76	0,00
Funcional	U	0,42	0,28	0,00	1,00
	Rw	0,73	0,36	1,00	0,00
Económico	CC	1,00	0,92	0,00	0,06

Verifica-se que a Parede 2 apresenta bom desempenho em todos os parâmetros ambientais, sendo que por outro lado o comportamento piora em termos funcionais. Relativamente ao indicador ambiental fica próxima da melhor solução, a Parede 1 (referência).

5.1.3. Agregação dos parâmetros

A agregação dos parâmetros tem como objetivo a agregação dos vários parâmetros dentro do indicador, em função da importância, permitindo uma compreensão mais simples do desempenho de cada solução. Na Tabela 29 são apresentados os valores obtidos nos três indicadores para cada uma das paredes estudadas.

Tabela 29 – Desempenho de cada indicador

Indicador	Valor			
	Parede 1	Parede 2	Parede 3	Parede 4
Ambiental (IA)	0,17	0,91	0,37	0,53
Funcional (IF)	0,50	0,30	0,25	0,75
Económico (IE)	1,00	0,92	0,00	0,06

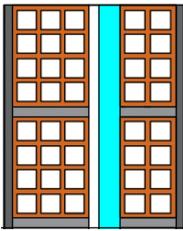
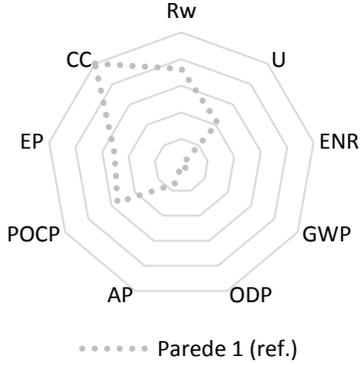
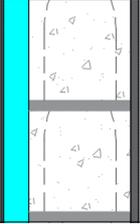
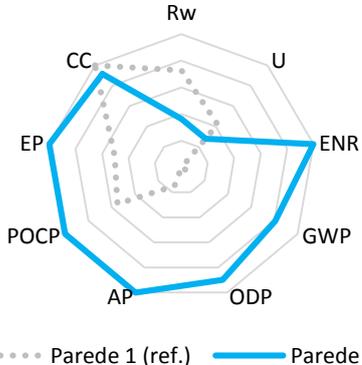
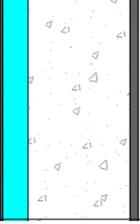
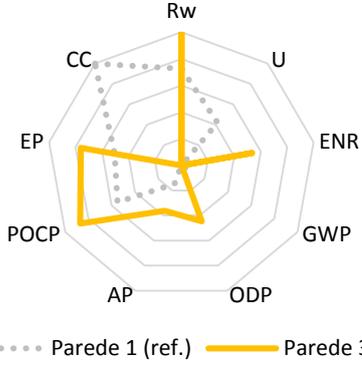
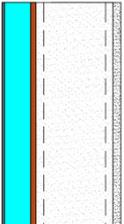
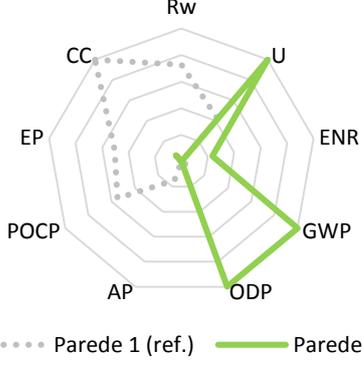
5.1.4. Resultados obtidos

Para a caracterização de cada uma das soluções são apresentados na Tabela 30 para além do desempenho em cada indicador, o perfil sustentável de cada solução e a sua comparação com o perfil da solução de referência. Por fim é obtida a nota sustentável que tem em conta o valor de cada indicador e o seu peso na nota global, o que permite concluir qual a classe de desempenho da solução em estudo comparativamente com a de referência.

A alvenaria estrutural (Parede 2) apresenta um excelente desempenho ao nível dos indicadores ambiental e económico. Esta solução quando comparada com a referência (Parede 1) tem um comportamento superior em todos os parâmetros ambientais, estando mais limitada nos funcionais e económicos. Ainda assim apresenta-se numa classe de desempenho superior.

As soluções de parede em betão armado (Parede 3) e em estrutura de aço leve (Parede 4) têm um comportamento superior à referência em alguns parâmetros. Contudo a sua classe de desempenho é inferior, o que permite concluir que não trazem melhorias significativas relativamente ao sistema convencional

Tabela 30 – Caracterização da Sustentabilidade relativa de cada uma das soluções

	Perfil Sustentável	Desempenho			Nota Sustentável	Classe de desempenho
		IA	IF	IE		
<p>Parede 1 (ref.)</p> 	 <p>..... Parede 1 (ref.)</p>	0,17	0,50	1,00	0,52	Referência
<p>Parede 2</p> 	 <p>..... Parede 1 (ref.) — Parede 2</p>	0,91	0,30	0,92	0,73	Superior
<p>Parede 3</p> 	 <p>..... Parede 1 (ref.) — Parede 3</p>	0,37	0,25	0,00	0,22	Inferior
<p>Parede 4</p> 	 <p>..... Parede 1 (ref.) — Parede 4</p>	0,53	0,75	0,06	0,45	Inferior

5.2. Moradias Unifamiliares

5.2.1. Inventário de ciclo de vida

O inventário de ciclo de vida (LCI) consiste na quantificação de todos os materiais e energia utilizados nas várias fases do ciclo de vida dos imóveis em estudo e teve como base os projetos de arquitetura e estabilidade. Dessa forma para a construção de cada um dos imóveis são necessárias as quantidades de materiais identificados na Tabela 31.

Tabela 31 – Massa de cada um dos materiais utilizados na fase de construção

Material		Edifício 1	Edifício 2
1	Abobadilhas betão (Kg)	41809,4	41012,5
2	Aço (Kg)	4082,8	3001,3
3	Acabamentos cerâmicos (Kg)	3653,8	3640,8
4	Alumínio (Kg)	1107,4	1027,1
5	Argamassa de assentamento (Kg)	12297,9	9409,5
6	Argamassa de reboco (Kg)	36698,6	31017,0
7	Argamassa ETICS (Kg)	-	2360,2
8	Betão (Kg)	177673,0	129057,1
9	Bloco BEST (Kg)	-	50112,0
10	Granito (Kg)	735,6	742,6
11	Lintéis de betão (Kg)	-	5040,0
12	Pavimentos de madeira (Kg)	657,8	670,8
13	EPS (Kg)	60,3	54,0
14	XPS (Kg)	940,4	1099,1
15	Portas de madeira (Kg)	576,6	590,9
16	Ripado em betão (Kg)	398,3	416,3
17	Telhas (Kg)	4718,4	4179,8
18	Tijolo 11 (Kg)	13658,1	-
19	Tijolo 15 (Kg)	29229,2	3284,3
20	Tinta (Kg)	414,0	429,8
21	Vidro (Kg)	401,3	328,3
22	Vigotas (Kg)	11330,8	12730,0
Total (Kg)		340443,7	300203,3

É importante analisar e comparar as quantidades dos vários materiais utilizados nos edifícios, desde logo as quantidades de betão. Tal como esperado este é o material com maior peso, sendo que ao nível das fundações, na alvenaria estrutural (Edifício 2) são utilizadas sapatas de fundação contínuas, enquanto no convencional (Edifício 1) são isoladas, mas algumas excêntricas o que obriga à aplicação de vigas de fundação, levando a que os edifícios sejam equivalentes em termos da dependência de betão. Ao nível das lajes e dos restantes elementos construtivos onde é aplicado o betão, as quantidades do material são similares nos 2 imóveis estudados, à exceção das vigas e pilares. O Edifício 1 é composto por uma estrutura porticada, enquanto no Edifício 2 as cargas são transmitidas através de vigas para as paredes resistentes. Assim, este sistema estrutural permite uma poupança significativa de betão e aço dada a não utilização de pilares, e por outro lado ao nível das vigas as quantidades são muito inferiores visto que estas para além de utilizarem menos armadura utilizam volumes de betão inferiores.

Ao nível da quantidade de aço, é gasto mais cerca de 25% no Edifício 1 essencialmente porque nos pilares é utilizado mais do dobro da quantidade aplicada nas paredes resistentes do Edifício 2.

Verifica-se ainda uma diferença acentuada ao nível das argamassas de reboco, justificada pelo facto de no edifício em Alvenaria estrutural não ser aplicado reboco tradicional mas sim o reboco armado (Argamassa de ETICS), no revestimento dos paramentos exteriores.

Dos restantes materiais tem interesse a comparação da quantidade de alvenarias (tijolo cerâmico e Bloco BEST) utilizadas. Na solução convencional é aplicada a parede dupla de tijolo cerâmico com aproximadamente 142 Kg/m^2 . No caso da solução em estudo as alvenarias têm função resistente, ficando as paredes com uma massa de 160 kg/m^2 . Estas diferenças são significativas e acentuam-se ainda mais quando se faz a análise ao nível do edifício. No Edifício 1 é aplicada a parede dupla nas paredes exteriores e parede simples no caso das paredes divisórias e na garagem, enquanto no Edifício 2 é necessária a utilização da parede resistente nas paredes exteriores do edifício, em algumas das paredes interiores (resistentes), tal como na garagem. Assim, no Edifício 1 são utilizadas aproximadamente 43 toneladas de alvenarias, enquanto no Edifício 2 são aplicadas 53,5 toneladas.

Em termos totais verifica-se que no edifício em betão armado (Edifício 1) e em alvenaria estrutural (Edifício 2) serão utilizadas aproximadamente 340 e 300 toneladas de materiais, respetivamente.

Na fase de utilização dos edifícios, devido à natural degradação dos materiais aplicados, há a necessidade de proceder a ações de manutenção dos mesmos. Tendo em conta a durabilidade esperada para cada um dos materiais utilizados, é necessário definir e temporizar essas intervenções.

Considerando uma vida útil de 50 anos, foram definidas as necessidades de substituição identificadas na Tabela 32, sendo baseadas nas garantias dos materiais e em bibliografia (Perret, 1995).

Tabela 32 – Intervenções de manutenção

Elemento construtivo	Substituição			
	Total		Parcial	
	Durabilidade (anos)	Substituições	Frequência (anos)	Percentagem
Fundações e superestrutura	50	0	-	-
Alvenarias	50	0	-	-
Acabamentos em madeira	40	1	20	35
Acabamentos em cerâmico	50	0	20	30
Acabamentos exteriores em reboco e reboco armado	30	1	-	-
Pinturas	10	4	-	-
Portas em madeira	30	1	-	-
Portas e janelas em alumínio	35	1	-	-
Isolamento térmico	50	0	-	-
Granitos	50	0	-	-
Telhas cerâmicas	35	1	2	2

Prevê-se a necessidade de substituição de portas e janelas em alumínio tal como os vidros constituintes devido às alterações ao longo do tempo que farão com que deixem de cumprir as exigências necessárias. Foi considerada a substituição integral das telhas ao fim de 35 anos, sendo que devido à necessidade de circulação para intervenções de limpeza e manutenção das

instalações aplicadas sobre o telhado, pelo lado da segurança estimou-se a substituição de dois por cento das telhas a cada dois anos.

Na Tabela 33 identificam-se as quantidades de materiais utilizados na manutenção dos imóveis.

Tabela 33 – Quantidade de materiais utilizados na manutenção

Material		Edifício 1	Edifício 2
3	Acabamentos cerâmicos (Kg)	2192,3	2184,5
4	Alumínio (Kg)	1107,4	1027,1
6	Argamassa de reboco (Kg)	8219,3	2359,3
7	Argamassa ETICS (Kg)	-	2360,2
12	Pavimentos de madeira (Kg)	888,0	905,6
15	Portas de madeira (Kg)	576,6	590,9
17	Telhas (Kg)	7077,6	6269,7
20	Tinta (Kg)	1656,1	1719,3
21	Vidro (Kg)	401,3	328,3
Total (Kg)		22118,5	17744,7

Nesta fase do ciclo de vida verifica-se a maior utilização de materiais no Edifício 1, cerca de 22,1 toneladas, sendo que no Edifício 2 são substituídas 17,7 toneladas, tendo as argamassas de reboco como o principal responsável por esta diferença.

Durante todo o ciclo de vida de cada um dos imóveis são utilizadas as quantidades identificadas na Tabela 34.

Tabela 34 – Quantidade de materiais utilizados em todo o ciclo de vida

Material		Edifício 1	Edifício 2
1	Abobadilhas betão (Kg)	41809,4	41012,5
2	Aço (Kg)	4082,8	3001,3
3	Acabamentos cerâmicos (Kg)	5846,0	5825,3
4	Alumínio (Kg)	2214,8	2054,1
5	Argamassa de assentamento (Kg)	12297,9	9409,5
6	Argamassa de reboco (Kg)	44917,9	33376,3
7	Argamassa ETICS (Kg)	-	4720,4
8	Betão (Kg)	177673,0	129057,1
9	Bloco BEST (Kg)	-	50112,0
10	Granito (Kg)	735,6	742,6
11	Lintéis de betão (Kg)	-	5040,0
12	Pavimentos de madeira (Kg)	1545,8	1576,4
13	EPS (Kg)	60,3	54,0
14	XPS (Kg)	940,4	1099,1
15	Portas de madeira (Kg)	1153,2	1181,8
16	Ripado (Kg)	398,3	416,3
17	Telhas (Kg)	11796,0	10449,5
18	Tijolo 11 (Kg)	13658,1	-
19	Tijolo 15 (Kg)	29229,2	3284,3
20	Tinta (Kg)	2070,1	2149,1
21	Vidro (Kg)	802,6	656,6
22	Vigotas (Kg)	11330,8	12730,0
Total (Kg)		362562,1	317948,0

Estes dados permitem concluir que durante todo o ciclo de vida são utilizadas 362,6 e 317,9 toneladas de materiais nos Edifícios 1 e 2, respetivamente, significando que são gastos mais cerca de 14% de massa de materiais no Edifício 1.

Para além da análise de inventário relativa aos materiais utilizados, é importante contabilizar a energia necessária para manter a qualidade do ambiente interior dentro de parâmetros confortáveis. Na Tabela 38 indicam-se as necessidades energéticas de cada uma das habitações, característica que está diretamente relacionada com o desempenho ambiental e económico de cada um dos edifícios.

5.2.2. Quantificação dos parâmetros

a. Indicador Funcional

O desenvolvimento do estudo térmico teve como base o Decreto lei nº 80/2006 de 4 de Abril (RCCTE), sendo que na Tabela 35 apresentam-se as características relacionadas com cada um dos imóveis e com a sua localização.

Tabela 35 – Caracterização térmica dos edifícios

		Edifício 1	Edifício 2
Tipologia		T3 geminada	
Número de pisos		2	
Área aquecida (m ²)		151,9	156,2
Pé-direito médio (m)		2,6	
Localização		Periferia de zona urbana	
Altitude do local (m)		57	
Distância à costa (km)		Superior a 5	
Orientação da fachada principal		Sul	
Inércia Térmica		Forte	Forte
Zona climática	Inverno	I1	
	Verão	V2-N	

Na Tabela 36 indicam-se os valores do coeficiente de transmissão térmica global (U) de cada elemento construtivo diferenciador dos dois edifícios, sendo que são apresentados mais pormenores relativos ao seu cálculo no Anexo 3.

Tabela 36 – Coeficiente de transmissão térmica global (U) dos elementos construtivos

		Edifício 1	Edifício 2
Paredes exteriores (W/m ² .°C)		0,47	0,49
Pontes térmicas	Vigas (W/m ² .°C)	0,72	0,61
	Pilares (W/m ² .°C)	0,72	-
	Caixas de estore (W/m ² .°C)	0,93	0,93

Na Tabela 37 apresentam-se as características consideradas para vãos envidraçados de ambos os edifícios.

Tabela 37 – Caracterização dos vãos envidraçados

	Edifício 1	Edifício 2
Tipo de vidro	Vidro duplo (5+6+4mm)	
Fator solar	0,75	
U (W/m ² .°C)	3	
Transmissão luminosa	0,72	
Fator solar, com dispositivo de proteção solar	0,04 ¹	
	0,37 ²	
Caixilharia	Alumínio sem corte térmico, sem quadrícula	
Fator da fração envidraçada	0,7	

Os valores relativos ao desempenho energético do Edifício 1 e do Edifício 2 são apresentados na Tabela 38.

Tabela 38 – Valores do desempenho energético

Desagregação das necessidades nominais de energia útil	Edifício 1	Edifício 2
Nic - Necessidades nominais de Aquecimento (kWh/ m ² .ano)	71,9	67,8
Ni - Nec. nominais de Aquecimento máximas (kWh/ m ² .ano)	83,9	82,6
Nvc - Necessidades nominais de Arrefecimento (kWh/ m ² .ano)	1,2	0,9
Nv - Nec. Nominais de Arrefecimento máximas (kWh/ m ² .ano)	18,0	18,0
Nac - Nec. nominais para preparação de AQS (kWh/ m ² .ano)	14,3	13,9
Na - Nec. nom. de preparação de AQS máximas (kWh/ m ² .ano)	31,1	30,3
Ntc - Necessidades nominais de energia primária (Kgep/ m ² .ano)	3,3	3,2
Nt - Necessidades nominais de energia primária máximas (Kgep/ m ² .ano)	5,1	5
Classe energética	B	B

¹ com estores de enrolar de cor clara pelo exterior

² com cortina opaca clara pelo interior

b. Indicador Ambiental

Na fase de construção consideram-se os impactes incorporados nos materiais de acordo com a quantidade utilizada, os que resultam do transporte que tem em conta a distância desde a proveniência até ao local da obra, tal como o tipo de veículo utilizado. Na Tabela 39 apresenta-se a distância e o tipo de veículo considerado para o transporte de cada material desde a fábrica até ao local da obra.

Tabela 39 – Caracterização do transporte de cada material

	Material	Proveniência	
		Distância	Tipo de veículo
1	Abobadilhas betão	5	Camião de grande tonelage
2	Aço	3,3	Camião de grande tonelage
3	Acabamentos cerâmicos	21,1	Camião de grande tonelage
4	Alumínio	2,4	Camião de grande tonelage
5	Argamassa de assentamento ³	0	-
6	Argamassa de reboco ⁴	0	-
7	Argamassa ETICS	211	VAN (capacidade < 3,5 toneladas)
8	Betão	48,6	Camião de grande tonelage
9	Bloco BEST	5	Camião de grande tonelage
10	Granito	144	Camião de grande tonelage
11	Lintéis de betão	5	Camião de grande tonelage
12	Pavimentos de madeira	96	Camião de grande tonelage
13	EPS	58,6	Camião de grande tonelage
14	XPS	58,6	Camião de grande tonelage
15	Portas de madeira	96	Camião de grande tonelage
16	Ripado	5	Camião de grande tonelage
17	Telhas	70,2	Camião de grande tonelage
18	Tijolo 11	70,2	Camião de grande tonelage
19	Tijolo 15	70,2	Camião de grande tonelage
20	Tinta	108	VAN (capacidade < 3,5 toneladas)
21	Vidro	2,4	Camião de grande tonelage
22	Vigotas	5	Camião de grande tonelage

³ Argamassa feita em obra com traço 1:5

⁴ Argamassa feita em obra com traço 1:4

Tendo em conta as características anteriormente enunciadas, da Tabela 40 à 43 são apresentados os impactes incorporados em cada um dos materiais utilizados na fase de construção, tal como os impactes relativos ao seu transporte entre a fábrica e o local da construção.

Tabela 40 – Impactes incorporados nos materiais utilizados no Edifício 1

Material	Categoria de Impacte Ambiental						Energia	
	ADP (Kg Sb eq)	GWP (Kg CO ₂ eq)	ODP (Kg CFC-11 eq)	AP (Kg SO ₂ eq)	POCP (Kg C ₂ H ₄ eq)	EP (Kg PO ₄ eq)	ENR (MJ eq)	ER (MJ eq)
1	9,91E+00	4,55E+03	1,52E-04	7,66E+00	2,81E-01	1,89E+00	2,38E+04	1,40E+03
2	7,08E+01	8,49E+03	2,25E-04	3,38E+01	4,84E+00	1,99E+01	1,18E+05	7,55E+03
3	2,28E+01	2,84E+03	3,03E-04	1,01E+01	4,85E-01	4,35E+00	5,16E+04	2,62E+03
4	1,43E+02	2,17E+04	1,52E-03	9,49E+01	7,13E+00	3,59E+01	3,28E+05	4,85E+04
5	3,07E+00	1,56E+03	4,58E-05	2,34E+00	8,49E-02	5,30E-01	6,89E+03	3,76E+02
6	1,09E+01	5,57E+03	1,62E-04	8,28E+00	3,01E-01	1,87E+00	2,51E+04	1,35E+03
8	4,21E+01	1,93E+04	6,46E-04	3,26E+01	1,20E+00	8,05E+00	1,01E+05	5,97E+03
10	9,03E-03	1,42E+00	1,66E-07	2,48E-02	3,90E-04	6,02E-03	2,05E+01	2,96E-01
12	1,60E+00	2,09E+02	1,81E-05	1,18E+00	8,94E-02	5,35E-01	3,99E+03	1,24E+04
13	2,80E+00	2,50E+02	6,70E-06	8,98E-01	4,07E-01	1,57E-01	6,34E+03	6,09E+01
14	4,09E+01	9,89E+03	1,55E-01	1,57E+01	1,21E+00	3,23E+00	9,34E+04	1,27E+03
15	5,28E+00	6,50E+02	5,54E-05	3,04E+00	1,84E-01	1,45E+00	1,27E+04	1,93E+04
16	1,27E-01	5,83E+01	1,95E-06	9,82E-02	3,60E-03	2,42E-02	3,06E+02	1,80E+01
17	8,13E+00	1,68E+03	1,09E-04	3,79E+00	2,76E-01	1,12E+00	1,81E+04	3,97E+02
18	1,62E+01	3,26E+03	2,17E-04	7,49E+00	5,44E-01	2,36E+00	3,32E+04	3,29E+03
19	3,43E+01	6,94E+03	4,61E-04	1,59E+01	1,16E+00	5,01E+00	7,75E+04	7,67E+03
20	9,87E+00	1,13E+03	1,55E-04	6,81E+00	3,19E-01	2,45E+00	2,22E+04	1,67E+03
21	2,30E+00	3,92E+02	3,24E-05	3,41E+00	1,15E-01	4,29E-01	4,97E+03	1,37E+02
22	2,67E+00	1,22E+03	4,10E-05	2,06E+00	7,56E-02	5,08E-01	6,42E+03	3,77E+02
Total	4,27E+02	8,97E+04	1,59E-01	2,50E+02	1,87E+01	8,98E+01	9,34E+05	1,14E+05

Tabela 41 - Impactes incorporados nos materiais e no seu transporte para o Edifício 1

	Categoria de Impacte Ambiental						Energia	
	ADP (Kg Sb eq)	GWP (Kg CO ₂ eq)	ODP (Kg CFC-11 eq)	AP (Kg SO ₂ eq)	POCP (Kg C ₂ H ₄ eq)	EP (Kg PO ₄ eq)	ENR (MJ eq)	ER (MJ eq)
Materialis	4,27E+02	8,97E+04	1,59E-01	2,50E+02	1,87E+01	8,98E+01	9,34E+05	1,14E+05
Transporte	1,63E+01	2,30E+03	3,63E-04	8,81E+00	2,80E-01	2,33E+00	3,79E+04	4,91E+02
Total	4,43E+02	9,20E+04	1,60E-01	2,59E+02	1,90E+01	9,21E+01	9,72E+05	1,15E+05

Tabela 42 – Impactes incorporados nos materiais utilizados no Edifício 2

Material	Categoria de Impacte Ambiental						Energia	
	ADP (Kg Sb eq)	GWP (Kg CO ₂ eq)	ODP (Kg CFC-11 eq)	AP (Kg SO ₂ eq)	POCP (Kg C ₂ H ₄ eq)	EP (Kg PO ₄ eq)	ENR (MJ eq)	ER (MJ eq)
1	9,71E+00	4,46E+03	1,49E-04	7,50E+00	2,75E-01	1,85E+00	2,34E+04	1,38E+03
2	5,21E+01	6,24E+03	1,66E-04	2,48E+01	3,55E+00	1,47E+01	8,72E+04	5,55E+03
3	2,27E+01	2,83E+03	3,02E-04	1,01E+01	4,84E-01	4,33E+00	5,13E+04	2,62E+03
4	1,28E+02	1,95E+04	1,37E-03	8,54E+01	6,42E+00	3,23E+01	2,95E+05	4,33E+04
5	2,35E+00	1,20E+03	3,51E-05	1,79E+00	6,50E-02	4,06E-01	1,05E+07	5,61E+05
6	9,22E+00	4,71E+03	1,37E-04	7,00E+00	2,55E-01	1,58E+00	4,14E+07	2,22E+06
7	7,01E-01	3,58E+02	1,04E-05	5,32E-01	1,94E-02	1,20E-01	3,14E+06	1,68E+05
8	3,06E+01	1,40E+04	4,69E-04	2,37E+01	8,68E-01	5,84E+00	7,36E+04	4,33E+03
9	1,19E+01	5,45E+03	1,82E-04	9,16E+00	3,36E-01	2,26E+00	2,85E+04	1,68E+03
10	9,11E-03	1,43E+00	1,68E-07	2,50E-02	3,94E-04	6,07E-03	2,07E+01	2,99E-01
11	1,19E+00	5,47E+02	1,83E-05	9,20E-01	3,38E-02	2,27E-01	2,85E+04	1,69E+02
12	1,63E+00	2,13E+02	1,84E-05	1,20E+00	9,12E-02	5,46E-01	2,65E+06	8,24E+06
13	2,50E+00	2,24E+02	6,00E-06	8,05E-01	3,65E-01	1,41E-01	5,67E+03	5,45E+01
14	4,78E+01	1,16E+04	1,81E-01	1,84E+01	1,41E+00	3,78E+00	1,09E+05	1,48E+03
15	5,41E+00	6,66E+02	5,68E-05	3,12E+00	1,88E-01	1,49E+00	1,30E+04	1,97E+04
16	1,04E-01	4,76E+01	1,59E-06	8,00E-02	2,94E-03	1,98E-02	6,24E+03	1,47E+01
17	7,20E+00	1,49E+03	9,70E-05	3,35E+00	2,45E-01	9,93E-01	1,60E+04	3,52E+02
19	3,87E+00	7,82E+02	5,19E-05	1,79E+00	1,30E-01	5,64E-01	8,46E+03	8,39E+02
20	1,03E+01	1,17E+03	1,61E-04	7,07E+00	3,32E-01	2,55E+00	2,30E+04	1,73E+03
21	1,88E+00	3,21E+02	2,65E-05	2,79E+00	9,38E-02	3,51E-01	4,07E+03	1,12E+02
22	3,00E+00	1,38E+03	4,61E-05	2,32E+00	8,51E-02	5,73E-01	7,23E+03	4,26E+02
Total	3,52E+02	7,72E+04	1,84E-01	2,12E+02	1,53E+01	7,46E+01	5,85E+07	1,13E+07

Tabela 43 - Impactes incorporados nos materiais e no seu transporte para o Edifício 2

	Categoria de Impacte Ambiental						Energia	
	ADP (Kg Sb eq)	GWP (Kg CO ₂ eq)	ODP (Kg CFC-11 eq)	AP (Kg SO ₂ eq)	POCP (Kg C ₂ H ₄ eq)	EP (Kg PO ₄ eq)	ENR (MJ eq)	ER (MJ eq)
Materiais	3,52E+02	7,72E+04	1,84E-01	2,12E+02	1,53E+01	7,46E+01	5,85E+07	1,13E+07
Transporte	1,62E+01	2,32E+03	3,48E-04	8,81E+00	5,42E-01	2,59E+00	3,86E+04	7,31E+02
Total	3,68E+02	7,95E+04	1,85E-01	2,21E+02	1,58E+01	7,72E+01	5,85E+07	1,13E+07

Tendo por base os valores obtidos relativos aos impactes incorporados em cada um dos materiais, e uma vez que o elemento construtivo diferenciador dos dois edifícios é a parede da envolvente exterior, é importante perceber de que modo as paredes exteriores influenciam o impacte ambiental global de cada edifício. A Figura 50 permite concluir que a parede dupla em tijolo cerâmico mesmo com uma massa inferior tem uma contribuição superior para os impactes do Edifício 1, relativamente à parede em Bloco BEST utilizada no Edifício 2.

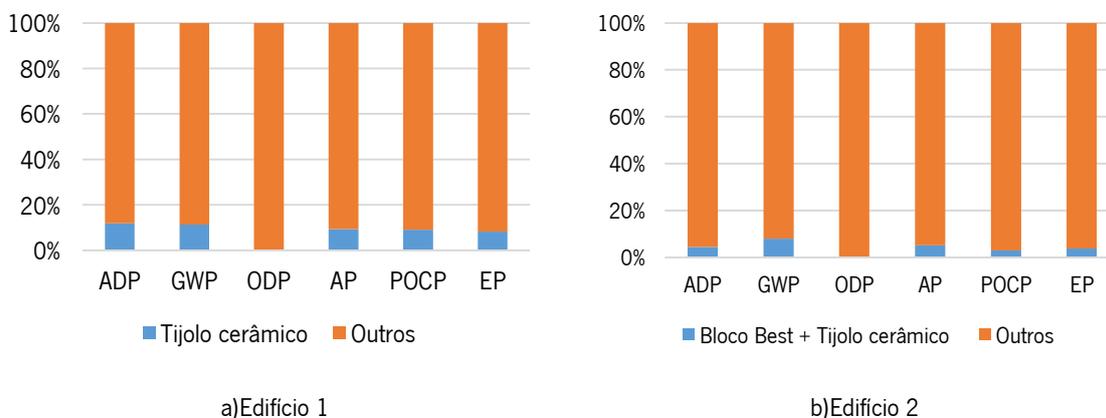


Figura 50 – Comparação da contribuição das alvenarias para o impacte de cada edifício

Contudo, de todos os materiais usados em cada um dos edifícios verifica-se pela Figura 51 que o aço, o alumínio, o betão e o XPS contribuem com a maior percentagem. De salientar o contributo de perto de 100% do XPS para o ODP, enquanto nos restantes parâmetros ambientais destaca-se o alumínio que mesmo tendo uma massa bastante inferior à do aço e do betão tem impactes superiores.

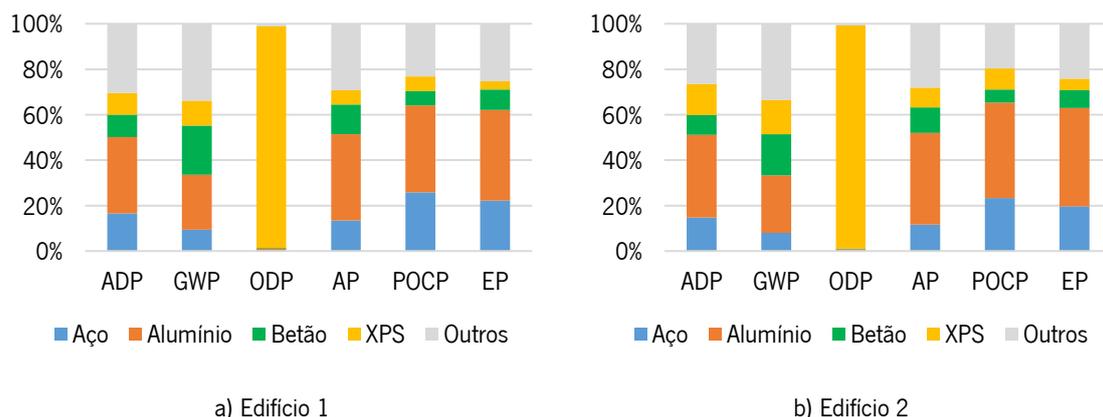


Figura 51 – Contribuição dos quatro materiais com maiores impactes

Analisando a Figura 52 verifica-se que em ambas as construções os impactes relativos ao transporte dos materiais são pouco significativos quando comparados com os impactes incorporados nos materiais.

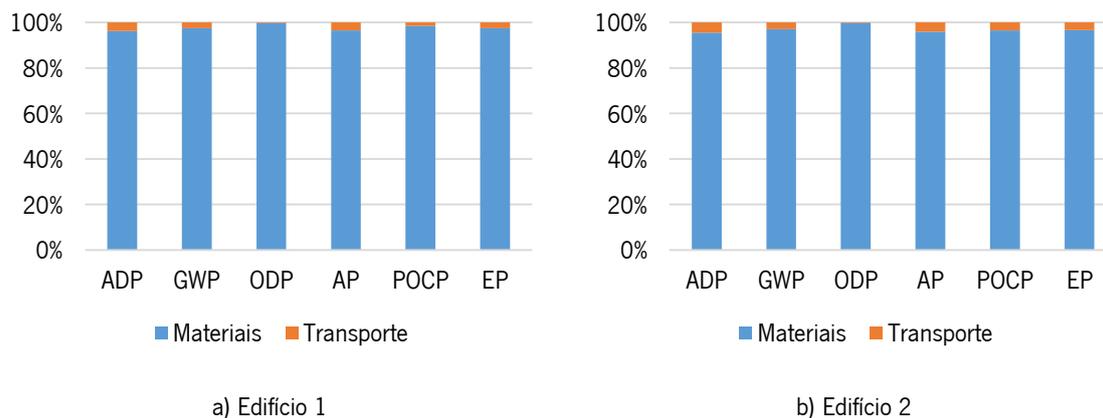


Figura 52 – Contribuição dos materiais e do seu transporte

Passando para a fase de utilização dos imóveis é necessário ter em conta todas as ações que provocam efeitos negativos sobre o meio ambiente. Esta fase divide-se nas necessidades de manutenção e de operação, sendo que no primeiro caso é necessário ter em conta os impactes provenientes da aquisição de novos materiais tal como da deposição dos materiais substituídos. A quantidade de materiais substituídos já foi anteriormente definida, sendo que se mantêm as características relativas ao seu transporte consideradas na fase de construção, havendo apenas a necessidade de definir as características relativas ao destino final de cada um dos materiais

substituídos. Para tal foi definida a última fase da vida útil dos materiais de acordo com a Tabela 44.

Tabela 44 – Caracterização do destino de cada um dos materiais

Material	Destino como resíduo		
	Distância (Km)	Tipo de veículo	Recuperação (%)
1 Abobadilhas de betão	23,1	Camião de grande tonelagem	0
2 Aço	23,1	Camião de grande tonelagem	75
3 Acabamentos cerâmicos	23,1	Camião de grande tonelagem	0
4 Alumínio	23,1	Camião de grande tonelagem	90
5 Argamassa de assentamento	23,1	Camião de grande tonelagem	0
6 Argamassa de reboco	23,1	Camião de grande tonelagem	0
7 Argamassa ETICS	23,1	Camião de grande tonelagem	0
8 Betão	23,1	Camião de grande tonelagem	0
9 Bloco BEST	23,1	Camião de grande tonelagem	0
10 Granito	23,1	Camião de grande tonelagem	0
11 Lintéis de betão	23,1	Camião de grande tonelagem	0
12 Pavimentos de madeira	23,1	Camião de grande tonelagem	0
13 EPS	47,7	Camião de grande tonelagem	80
14 XPS	47,7	Camião de grande tonelagem	80
15 Portas de madeira	23,1	Camião de grande tonelagem	0
16 Ripado	23,1	Camião de grande tonelagem	0
17 Telhas	23,1	Camião de grande tonelagem	0
18 Tijolo 11	23,1	Camião de grande tonelagem	0
19 Tijolo 15	23,1	Camião de grande tonelagem	0
20 Tinta	23,1	Camião de grande tonelagem	0
21 Vidro	23,1	Camião de grande tonelagem	90
22 Vigotas	23,1	Camião de grande tonelagem	0

São apresentados na Tabela 45 os impactes incorporados em cada um dos materiais utilizados na manutenção do Edifício 1. Na Tabela 46 para além dos impactes totais dos materiais referem-se os que se devem ao seu transporte até à obra e os que estão associados à deposição dos materiais substituídos. Nas Tabelas 47 e 48 são apresentados os dados relativos ao Edifício 2.

Tabela 45 - Impactes ambientais na manutenção do Edifício 1

Material	Categoria de Impacte Ambiental						Energia	
	ADP (Kg Sb eq)	GWP (Kg CO ₂ eq)	ODP (Kg CFC-11 eq)	AP (Kg SO ₂ eq)	POCP (Kg C ₂ H ₄ eq)	EP (Kg PO ₄ eq)	ENR (MJ eq)	ER (MJ eq)
3	1,37E+01	1,71E+03	1,82E-04	6,07E+00	2,91E-01	2,61E+00	3,09E+04	1,58E+03
4	1,43E+02	2,17E+04	1,52E-03	9,49E+01	7,13E+00	3,59E+01	3,28E+05	4,81E+04
6	2,44E+00	1,25E+03	3,64E-05	1,86E+00	6,75E-02	4,20E-01	5,63E+03	3,02E+02
12	2,16E+00	2,82E+02	2,45E-05	1,60E+00	1,21E-01	7,25E-01	5,40E+03	1,69E+04
15	5,28E+00	6,50E+02	5,54E-05	3,04E+00	1,84E-01	1,45E+00	1,27E+04	1,93E+04
17	1,22E+01	2,53E+03	1,64E-04	5,68E+00	4,14E-01	1,68E+00	2,71E+04	5,95E+02
20	3,95E+01	4,52E+03	6,19E-04	2,72E+01	1,28E+00	9,81E+00	8,87E+04	6,68E+03
21	2,30E+00	3,92E+02	3,24E-05	3,41E+00	1,15E-01	4,29E-01	4,97E+03	1,37E+02
Total	2,21E+02	3,30E+04	2,63E-03	1,44E+02	9,60E+00	5,30E+01	5,03E+05	9,36E+04

Tabela 46 - Impactes relativos aos materiais, transporte e deposição no Edifício 1

	Categoria de Impacte Ambiental						Energia	
	ADP (Kg Sb eq)	GWP (Kg CO ₂ eq)	ODP (Kg CFC-11 eq)	AP (Kg SO ₂ eq)	POCP (Kg C ₂ H ₄ eq)	EP (Kg PO ₄ eq)	ENR (MJ eq)	ER (MJ eq)
Materiais	2,21E+02	3,30E+04	2,63E-03	1,44E+02	9,60E+00	5,30E+01	5,03E+05	9,36E+04
Transporte	3,37E+00	4,82E+02	7,08E-05	1,84E+00	1,44E-01	5,72E-01	8,16E+03	1,85E+02
Deposição	3,07E-01	4,32E+01	6,83E-06	1,66E-01	5,28E-03	4,38E-02	7,13E+02	9,24E+00
Total	2,24E+02	3,36E+04	2,71E-03	1,46E+02	9,75E+00	5,36E+01	5,12E+05	9,38E+04

Tabela 47 - Impactes ambientais na manutenção do Edifício 2

Material	Categoria de Impacte Ambiental						Energia	
	ADP (Kg Sb eq)	GWP (Kg CO ₂ eq)	ODP (Kg CFC-11 eq)	AP (Kg SO ₂ eq)	POCP (Kg C ₂ H ₄ eq)	EP (Kg PO ₄ eq)	ENR (MJ eq)	ER (MJ eq)
3	1,36E+01	1,70E+03	1,81E-04	6,05E+00	2,90E-01	2,60E+00	3,08E+04	1,57E+03
4	1,28E+02	1,95E+04	1,37E-03	8,54E+01	6,42E+00	3,23E+01	2,96E+05	4,33E+04
6	7,01E-01	3,58E+02	1,04E-05	5,32E-01	1,94E-02	1,20E-01	1,61E+03	8,64E+01
7	7,01E-01	3,58E+02	1,04E-05	5,32E-01	1,94E-02	1,20E-01	1,61E+03	8,64E+01
12	2,19E+00	2,86E+02	2,48E-05	1,62E+00	1,23E-01	7,36E-01	5,48E+03	1,71E+04
15	5,41E+00	6,66E+02	5,68E-05	3,12E+00	1,88E-01	1,49E+00	1,30E+04	1,97E+04
17	1,08E+01	2,24E+03	1,45E-04	5,03E+00	3,67E-01	1,49E+00	2,40E+04	5,28E+02
20	4,10E+01	4,69E+03	6,43E-04	2,83E+01	1,33E+00	1,02E+01	9,21E+04	6,93E+03
21	1,88E+00	3,21E+02	2,65E-05	2,79E+00	9,38E-02	3,51E-01	4,07E+03	1,12E+02
Total	2,04E+02	3,01E+04	2,47E-03	1,33E+02	8,85E+00	4,94E+01	4,68E+05	8,95E+04

Tabela 48 - Impactes relativos aos materiais, transporte e deposição no Edifício 2

	Categoria de Impacte Ambiental						Energia	
	ADP (Kg Sb eq)	GWP (Kg CO ₂ eq)	ODP (Kg CFC-11 eq)	AP (Kg SO ₂ eq)	POCP (Kg C ₂ H ₄ eq)	EP (Kg PO ₄ eq)	ENR (MJ eq)	ER (MJ eq)
Materiais	2,04E+02	3,01E+04	2,47E-03	1,33E+02	8,85E+00	4,94E+01	4,68E+05	8,95E+04
Transporte	9,92E+00	1,44E+03	2,10E-04	5,44E+00	5,02E-01	1,77E+00	2,42E+04	6,08E+02
Deposição	2,85E-01	4,00E+01	6,33E-06	1,54E-01	4,89E-03	4,06E-02	6,61E+02	8,55E+00
Total	2,14E+02	3,16E+04	2,68E-03	1,39E+02	9,36E+00	5,12E+01	4,93E+05	9,01E+04

Tendo por base os valores obtidos e analisando a Figura 53 verifica-se que em ambos os imóveis a substituição dos alumínio e as várias intervenções de pintura são responsáveis por mais de 75% dos impactes provocados pela manutenção.

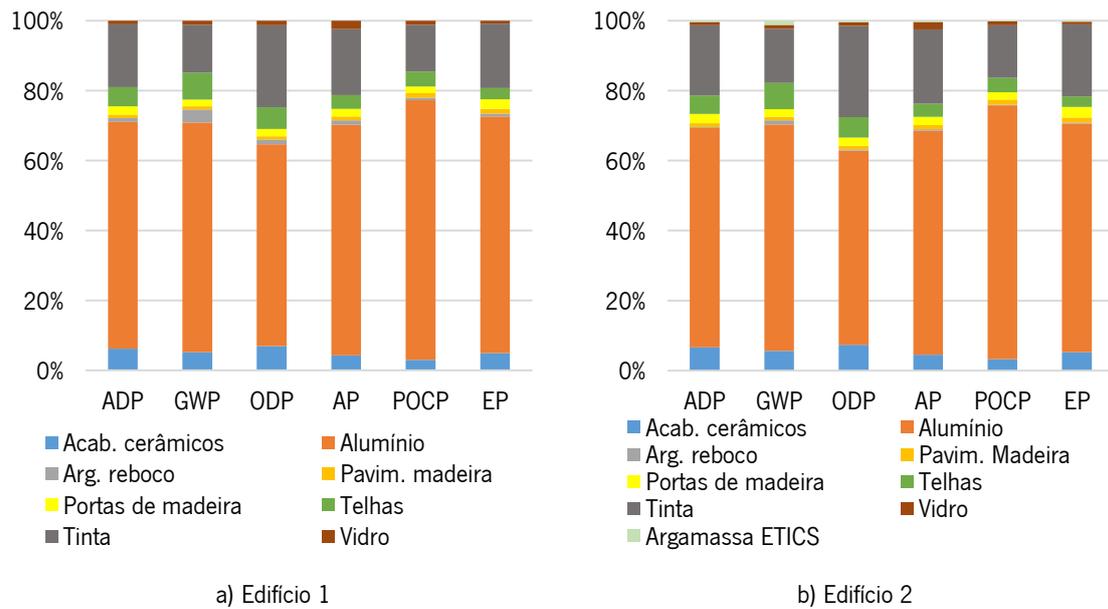


Figura 53 – Contribuição dos materiais e do seu transporte

Relativamente aos impactos de cada uma das fases da vida dos materiais, verifica-se pela Figura 54 que o seu transporte e deposição têm pouco significado quando comparados com os efeitos negativos decorrentes da sua produção, sendo esta diferença mais acentuada no Edifício 1 devido à maior quantidade de material transportado.

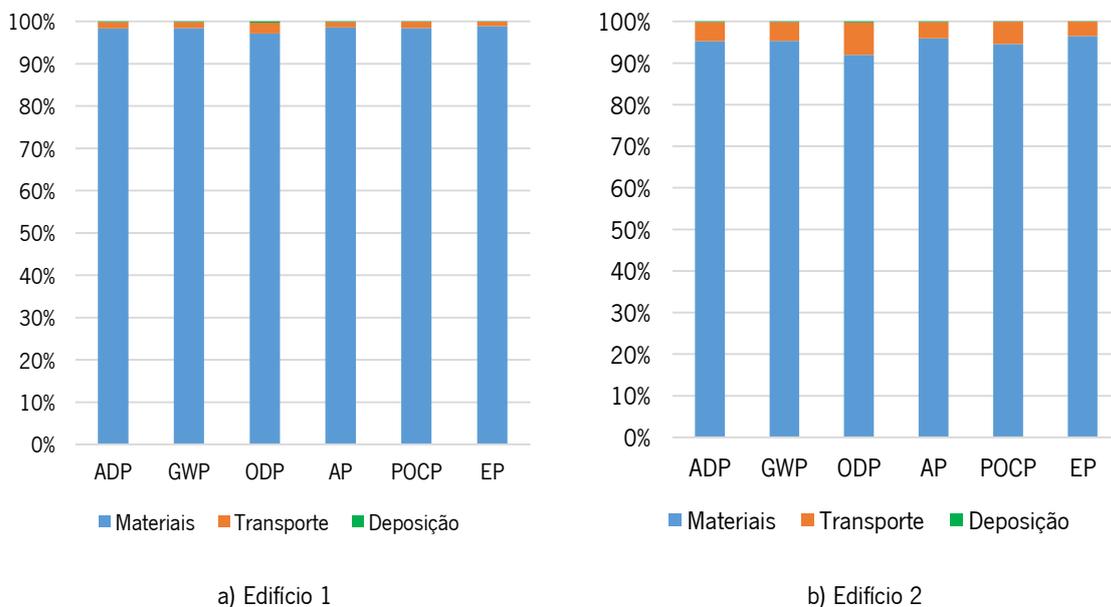


Figura 54 – Contribuição da produção, do transporte e da deposição dos materiais

Para além dos impactes diretamente relacionados com a manutenção de cada um dos edifícios é necessário considerar a parcela relativa aos impactes provocados pela sua utilização diária, ou seja, na fase de operação. Estes estão relacionados com a energia necessária para proporcionar conforto aos seus utilizadores nas várias fases do ano e para aquecimento da água, tendo sempre em consideração a energia produzida localmente através de fontes renováveis. Feito este balanço é possível converter a energia que é necessária durante a vida útil de cada um dos imóveis em potenciais impactes negativos para o meio ambiente. É importante voltar a referir que as necessidades de aquecimento e arrefecimento são colmatadas com recurso a energia elétrica, sendo que as águas são aquecidas com recurso a combustível gasoso. Apresentam-se nas Tabelas 49 e 50 os impactes provocados pela utilização de energia durante a vida útil do Edifício 1 e do Edifício 2, respetivamente.

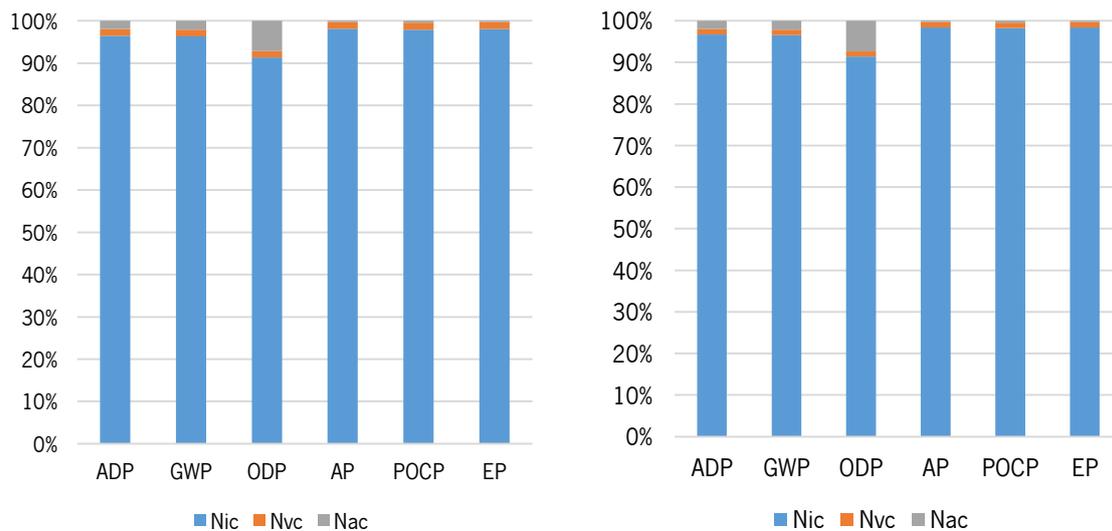
Tabela 49 – Impactes provocados pela energia no Edifício 1

	Categoria de Impacte Ambiental						Energia	
	ADP (Kg Sb eq)	GWP (Kg CO ₂ eq)	ODP (Kg CFC-11 eq)	AP (Kg SO ₂ eq)	POCP (Kg C ₂ H ₄ eq)	EP (Kg PO ₄ eq)	ENR (MJ eq)	ER (MJ eq)
Nic	2,86E+03	3,78E+05	2,24E-02	3,43E+03	1,28E+02	6,44E+02	9,60E+05	5,38E+06
Nvc	4,77E+01	6,31E+03	3,75E-04	5,73E+01	2,14E+00	1,08E+01	1,60E+04	8,98E+04
Nac	5,70E+01	8,27E+03	1,76E-03	9,33E+00	5,93E-01	1,96E+00	2,22 E+02	1,29E+05
Total	2,96E+03	3,92E+05	2,46E-02	3,50E+03	1,31E+02	6,57E+02	9,76E+05	5,60E+06

Tabela 50 - Impactes provocados pela energia no Edifício 2

	Categoria de Impacte Ambiental						Energia	
	ADP (Kg Sb eq)	GWP (Kg CO ₂ eq)	ODP (Kg CFC-11 eq)	AP (Kg SO ₂ eq)	POCP (Kg C ₂ H ₄ eq)	EP (Kg PO ₄ eq)	ENR (MJ eq)	ER (MJ eq)
Nic	2,77E+03	3,66E+05	2,18E-02	3,33E+03	1,24E+02	6,25E+02	9,31E+05	5,22E+06
Nvc	3,68E+01	4,86E+03	2,89E-04	4,42E+01	1,65E+00	8,29E+00	1,24E+04	6,93E+04
Nac	5,69E+01	8,26E+03	1,76E-03	9,31E+00	5,92E-01	1,95E+00	2,22E+02	1,29E+05
Total	2,86E+03	3,80E+05	2,38E-02	3,38E+03	1,27E+02	6,35E+02	9,43E+05	5,42E+06

Ao analisar a Figura 55 é possível concluir que os impactes relativos à energia necessária para aquecimento são em todos os parâmetros ambientais superiores a 90%. Comparando os dois edifícios é possível confirmar tal como esperado, que as diferenças são pouco significativas.



a) Edifício 1

b) Edifício 2

Figura 55 – Contribuição das necessidades nominais de energia

A última fase da vida de cada um dos imóveis é a sua demolição, havendo a necessidade de transportar os materiais até empresas especializadas e devidamente autorizadas à receção e tratamento de Resíduos da Construção e Demolição (RCD's).

Para quantificar os impactes associados à última fase da vida dos imóveis é necessário ter em conta a quantidade de materiais utilizados na construção dos edifícios e a caracterização do seu transporte até ao destino final, apresentados na Tabela 51.

Tabela 51 – Quantificação dos materiais para deposição e caracterização do seu destino

Material	Quantidade (Kg)		Destino como resíduo		
	Edifício 1	Edifício 2	Distância	Tipo de veículo	Recuperação (%)
Abobadilhas betão	41809,4	41012,5	23,1	Camião de grande tonelage	0
Aço	4082,8	3001,3	23,1	Camião de grande tonelage	75
Acabamentos cerâmicos	3653,8	3640,8	23,1	Camião de grande tonelage	0
Alumínio	1107,4	1027,1	23,1	Camião de grande tonelage	90
Argamassa de assentamento	12297,9	9409,5	23,1	Camião de grande tonelage	0
Argamassa de reboco	36698,6	31017,0	23,1	Camião de grande tonelage	0
Argamassa ETICS	-	2360,2	23,1	Camião de grande tonelage	0
Betão	177673,0	129057,1	23,1	Camião de grande tonelage	0
Bloco BEST	-	50112,0	23,1	Camião de grande tonelage	0
Granito	735,6	742,6	23,1	Camião de grande tonelage	0
Lintéis de betão	-	5040,0	23,1	Camião de grande tonelage	0
Pavimentos de madeira	657,8	670,8	23,1	Camião de grande tonelage	0
EPS	60,3	54,0	47,7	Camião de grande tonelage	80
XPS	940,4	1099,1	47,7	Camião de grande tonelage	80
Portas de madeira	576,6	590,9	23,1	Camião de grande tonelage	0
Ripado	398,3	416,3	23,1	Camião de grande tonelage	0
Telhas	4718,4	4179,8	23,1	Camião de grande tonelage	0
Tijolo 11	13658,1	-	23,1	Camião de grande tonelage	0
Tijolo 15	29229,2	3284,3	23,1	Camião de grande tonelage	0
Tinta	414,0	429,8	23,1	Camião de grande tonelage	0
Vidro	401,3	328,3	23,1	Camião de grande tonelage	90
Vigotas	11330,8	12730,0	23,1	Camião de grande tonelage	0

Tendo em consideração as características anteriores, na Tabela 52 são apresentados os impactes e a quantidade de energia relativos à fase de demolição dos imóveis.

Tabela 52 – Impactes relativos à deposição dos materiais

	Categoria de Impacte Ambiental						Energia	
	ADP (Kg Sb eq)	GWP (Kg CO ₂ eq)	ODP (Kg CFC-11 eq)	AP (Kg SO ₂ eq)	POCP (Kg C ₂ H ₄ eq)	EP (Kg PO ₄ eq)	ENR (MJ eq)	ER (MJ eq)
Edifício 1	1,57E+00	2,21E+02	3,50E-05	8,50E-01	2,71E-02	2,24E-01	1,06E+03	1,37E+01
Edifício 2	4,56E-01	6,42E+01	1,01E-05	2,46E-01	7,48E-03	6,50E-02	7,13E+02	9,24E+00

Relativamente ao desempenho ambiental são apresentados nas Tabelas 53 e 54 os impactes em cada uma das fases da sua vida útil tal como o total para cada um dos edifícios.

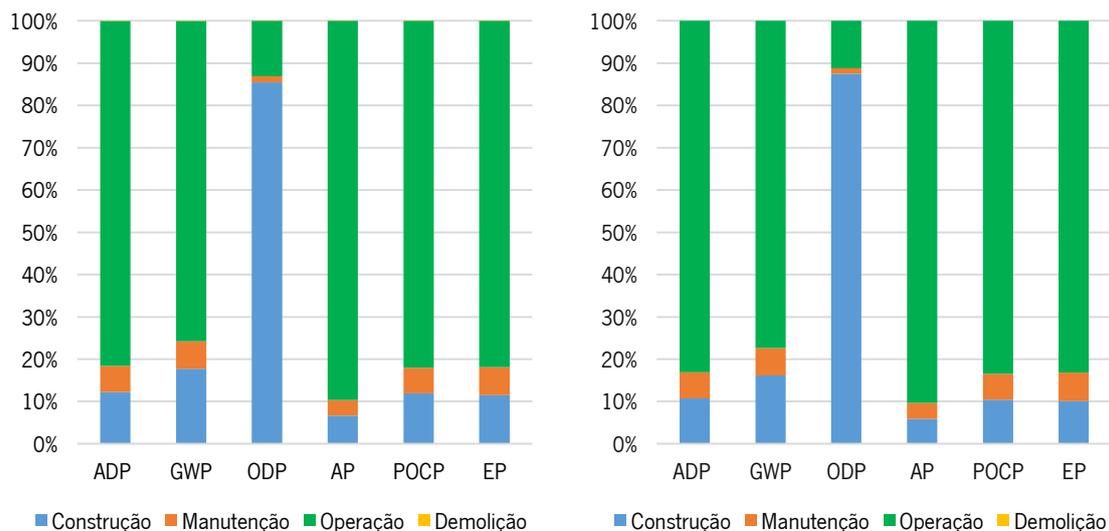
Tabela 53 – Impactes de cada uma das fases da vida útil do Edifício 1

	Categoria de Impacte Ambiental						Energia	
	ADP (Kg Sb eq)	GWP (Kg CO ₂ eq)	ODP (Kg CFC-11 eq)	AP (Kg SO ₂ eq)	POCP (Kg C ₂ H ₄ eq)	EP (Kg PO ₄ eq)	ENR (MJ eq)	ER (MJ eq)
Construção	4,43E+02	9,20E+04	1,60E-01	2,59E+02	1,90E+01	9,21E+01	9,72E+05	1,15E+05
Manutenção	2,24E+02	3,36E+04	2,71E-03	1,46E+02	9,75E+00	5,36E+01	5,12E+05	9,38E+04
Operação	2,96E+03	3,92E+05	2,46E-02	3,50E+03	1,31E+02	6,57E+02	9,76E+05	5,60E+06
Demolição	1,57E+00	2,21E+02	3,50E-05	8,50E-01	2,71E-02	2,24E-01	3,66E+03	4,74E+01
Total	3,63E+03	5,18E+05	1,87E-01	3,91E+03	1,60E+02	8,03E+02	2,46E+06	5,81E+06

Tabela 54 - Impactes de cada uma das fases da vida útil do Edifício 2

	Categoria de Impacte Ambiental						Energia	
	ADP (Kg Sb eq)	GWP (Kg CO ₂ eq)	ODP (Kg CFC-11 eq)	AP (Kg SO ₂ eq)	POCP (Kg C ₂ H ₄ eq)	EP (Kg PO ₄ eq)	ENR (MJ eq)	ER (MJ eq)
Construção	3,68E+02	7,95E+04	1,85E-01	2,21E+02	1,58E+01	7,72E+01	5,85E+07	1,13E+07
Manutenção	2,14E+02	3,16E+04	2,68E-03	1,39E+02	9,36E+00	5,12E+01	4,93E+05	9,01E+04
Operação	2,86E+03	3,80E+05	2,38E-02	3,38E+03	1,27E+02	6,35E+02	9,43E+05	5,42E+06
Demolição	4,56E-01	6,42E+01	1,01E-05	2,46E-01	7,48E-03	6,50E-02	1,06E+03	1,37E+01
Total	3,44E+03	4,91E+05	2,11E-01	3,74E+03	1,52E+02	7,63E+02	5,99E+07	1,68E+07

Depois de obtidos os valores verifica-se que à exceção do ODP em todos os parâmetros ambientais a fase de operação é a que provoca maiores impactes, ultrapassando os 75% do ciclo de vida. Tal como é possível analisar na Figura 56, de seguida encontra-se a construção e a manutenção, sendo pouco significativo o peso relativo à fase de demolição.



a) Edifício 1

b) Edifício 2

Figura 56 – Peso de cada uma das fases de vida útil

Como se pode verificar da Figura 57 à 62, fazendo a comparação dos edifícios ao nível de cada fase do ciclo de vida e em relação a cada um dos parâmetros é possível identificar que, à exceção do ODP na fase de construção, o Edifício 2 tem menores impactos ambientais. Por outro lado verifica-se que nesta mesma categoria a fase mais prejudicial é a construção, sendo que a operação dos edifícios é fase que mais contribui para as restantes categorias de impacto ambiental.

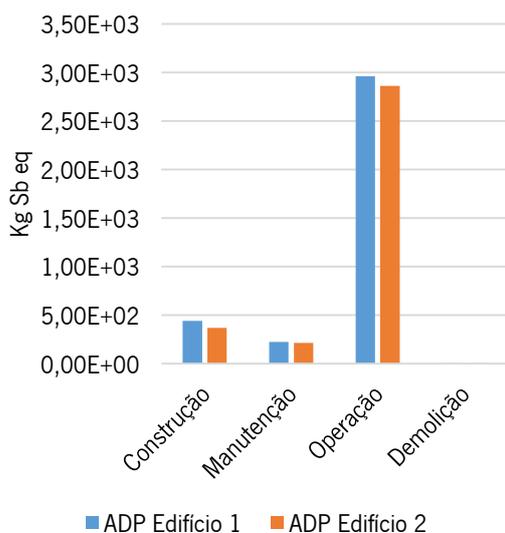


Figura 57 – Comparação dos edifícios no ADP

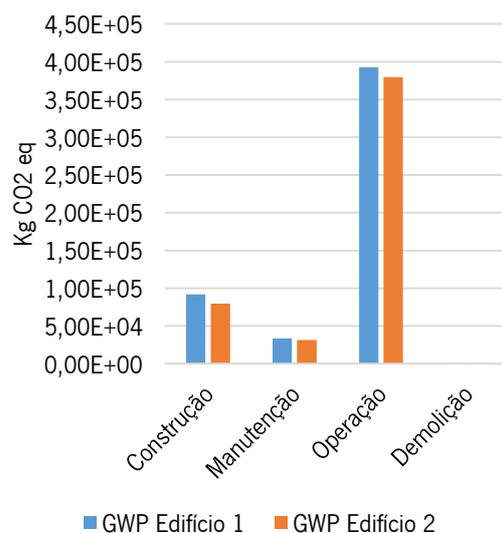


Figura 58 – Comparação dos edifícios no GWP

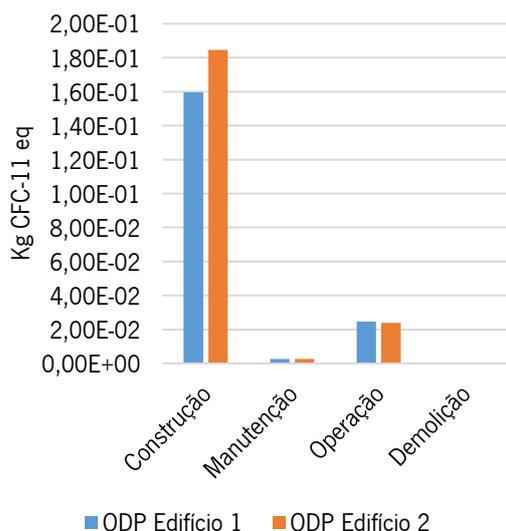


Figura 59 – Comparação dos edifícios no ODP

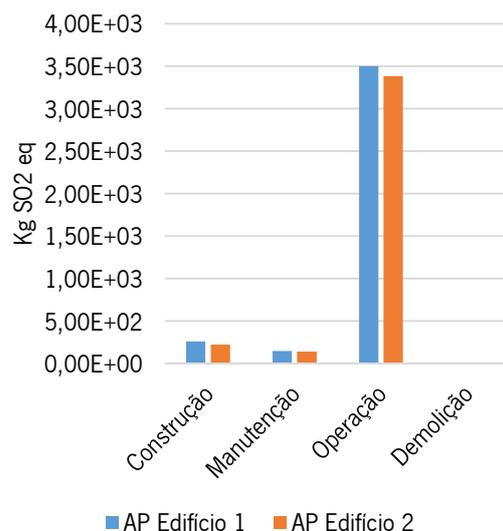


Figura 60 – Comparação dos edifícios no AP

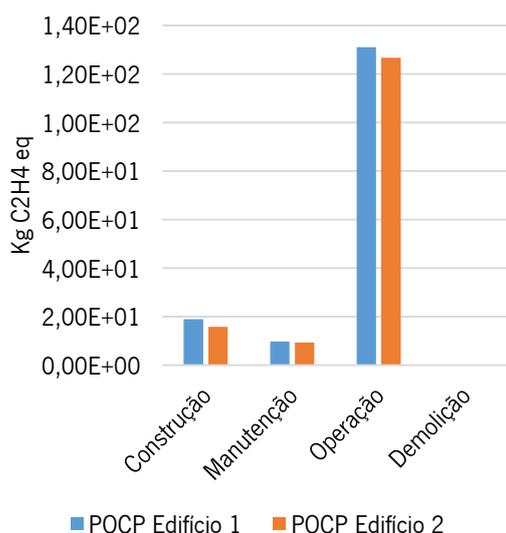


Figura 61 – Comparação dos edifícios no POCP

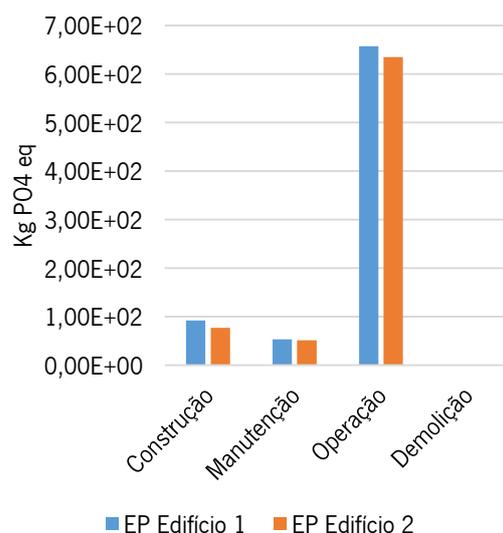


Figura 62 – Comparação dos edifícios no EP

c. Indicador Económico

O custo final de construção, tal como identificado na Tabela 55 fica nos 104584,3 euros para o Edifício 1 e em 98152,2 euros para o Edifício 2, o que dá 559,3 e 516,6 euros/m², respetivamente.

Tabela 55 – Custo de construção de cada um dos edifícios

	Edifício 1	Edifício 2
Custo Total (euros)	104584,3	98152,2
Custo por m ² útil (euros)	559,3	516,6

Neste caso, o edifício com o sistema construtivo onde é aplicado o Bloco BEST tem um custo de construção inferior ao convencional de aproximadamente 6432 euros.

Durante a fase de utilização consideram-se os custos associados às várias ações de manutenção e de aquisição de energia na fase de operação. Tendo em conta as intervenções de manutenção de cada um dos imóveis já anteriormente definidas, há a necessidade de substituição de vários materiais utilizados na sua construção. Assim sendo, os custos da fase de manutenção têm em conta não só os materiais, mão-de-obra e equipamentos necessários para a substituição mas também os que estão relacionados com o transporte e a deposição dos materiais substituídos. Na Tabela 56 indicam-se os custos relacionados com os materiais, mão-de-obra e equipamentos necessários para a substituição e na Tabela 57 os encargos económicos relacionados com o transporte e deposição dos materiais substituídos.

Tabela 56 – Custo de mão de mão-de-obra, equipamentos e materiais a substituir

Ano	Elemento	Percentagem substituída	Custo (euros)	
			Edifício 1	Edifício 2
10	Pinturas	100	7527,9	7814,9
20	Acabamentos cerâmicos	30	1244,3	1239,8
	Acabamentos em madeira	35	276,3	281,7
	Pinturas	100	7527,9	7814,9
30	Pinturas	100	7527,9	7814,9
	Portas em madeira	100	8100,0	10300,0
	Reboco armado	100	-	5954,9
	Reboco exterior	100	2037,3	584,8
35	Alumínios e vidros	100	9438,0	9017,0
	Telhas	100	2342,5	2075,1
40	Acabamentos cerâmicos	30	1244,3	1239,8
	Acabamentos em madeira	100	789,4	805,0
	Pinturas	100	7527,9	7814,9
Custo Total (euros)			55583,7	62757,7

A manutenção do Edifício 2 acarreta maiores encargos, devido ao elevado custo de substituição do reboco armado comparativamente com o reboco tradicional. Por outro lado as pinturas também têm alguma influência devido à área a pintar ser ligeiramente superior, e sendo esta operação realizada quatro vezes durante a vida útil do imóvel, esta diferença torna-se ainda mais significativa.

Tabela 57 – Custo de transporte e deposição dos materiais substituídos

Edifício 1		Edifício 2	
Quantidade (ton)	Custo	Quantidade (ton)	Custo
23	1932,6	18	1839,6

Assim sendo, e somando todos os custos associados à fase de manutenção chega-se aos valores indicados na Tabela 58.

Tabela 58 – Custos associados à fase de manutenção

	Edifício 1	Edifício 2
Custo Total (euros)	57516,3	64597,3
Custo por m ² útil (euros)	307,6	340,0
Custo anual por m ² útil (euros)	6,2	6,8

Como se pode verificar pelos valores apresentados, a manutenção do Edifício 2 tem um custo superior em 7081 euros. Considerando esse valor distribuído pelos 50 anos de utilização dos imóveis conclui-se que os custos anuais por cada metro quadrado são de 6,2 e 6,8 euros para o Edifício 1 e Edifício 2, respetivamente.

Ainda durante a utilização, para os custos associados à sua operação foram considerados diferentes tipos de energia para superar as necessidades dos edifícios. Na Tabela 59 indicam-se as necessidades de energia elétrica para aquecimento e arrefecimento e na Tabela 60 as que estão relacionadas com o combustível gasoso para preparação de águas quentes e sanitárias.

Tabela 59 – Necessidade anuais de energia para aquecimento e arrefecimento

	Edifício 1	Edifício 2
Nic + Nvc - Necessidades nominais de energia útil para aquecimento e arrefecimento (kWh/ano)	13669,7	13053
Custo anual (euros)	2169,4	2071,5

Tabela 60 – Necessidade anuais de energia para preparação de AQS

	Edifício 1	Edifício 2
Nac - Necessidades nominais para preparação de AQS (kWh/ano)	2172,2	2171,2
Contribuição do sistema solar, Esolar (kWh/ano)	1513	1513
Balanço (kWh/ano)	659,2	658,2
Custo anual (euros)	100,2	100,0

Assim podemos concluir que para cada uma das habitações são gastos os valores apresentados na Tabela 61. Tal como era de esperar uma vez que tem menores necessidade energética, os custos de operação do Edifício 2 são inferiores ao Edifício 1.

Tabela 61 – Custos na fase de operação de cada um dos edifícios

	Edifício 1	Edifício 2
Custo anual (euros)	2269,6	2171,5
Custos de operação (euros)	113480	108575

No final da vida útil de cada um dos imóveis é necessário a sua demolição para que todo o espaço fique limpo, havendo a necessidade de encaminhar os RCD's para empresas especializadas. Os custos associados a esta fase estão indicados na Tabela 62 e incluem todos os equipamentos e mão-de-obra necessários para a demolição de cada um dos edifícios, tal como os custos associados ao transporte e à deposição em vazadouro dos vários materiais.

Tabela 62 – Custos de demolição

Descrição	Edifício 1		Edifício 2	
	Quantidade (ton)	Custo	Quantidade (ton)	Custo
Estaleiro e mão de obra	-	8610,0	-	8610,0
Acabamentos e alvenarias	106	4579,2	122	5270,4
Alumínios e vidros	2	812,6	2	812,6
Betão, aço e argamassas	231	4285,1	175	3246,3
Madeiras	2	748,0	2	748,0
EPS e XPS	2	738,0	2	738,0
Total	343	19772,9	303	19425,3

Verifica-se que a diferença dos custos com cada um dos edifícios na última fase do ciclo de vida é pouco significativa, sendo que no Edifício 1 são gastos aproximadamente mais 348 euros.

Na Tabela 63 são resumidos os custos associados a cada uma das fases da vida dos edifícios, e na Figura 64 é feita a sua representação gráfica. Tal como já tinha concluído anteriormente o Edifício 2 acarreta maiores custos apenas na fase de manutenção. Na fase de demolição o desempenho económico das soluções é equivalente, sendo que na construção e operação o edifício em alvenaria estrutural (Edifício 2) apresenta melhor comportamento. Tal como demonstrado na Figura 64, em ambos os imóveis as fases de construção e operação significam mais de 70% do custo total.

Tabela 63 – Custos de ciclo de vida dos edifícios

	Edifício 1	Edifício 2
Construção	104584,3	98152,2
Manutenção	57516,3	64597,3
Operação	113480	108575
Demolição	19772,9	19425,3
Custo Total (euros)	295353,5	290749,8
Custo por m² útil (euros)	1579,4	1530,3

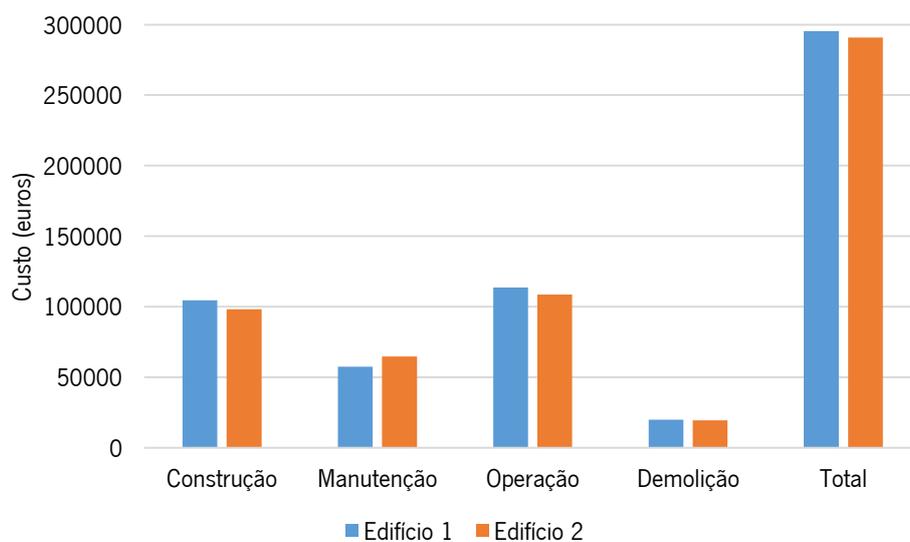


Figura 63 – Custo associado a cada fase do ciclo de vida dos edifícios

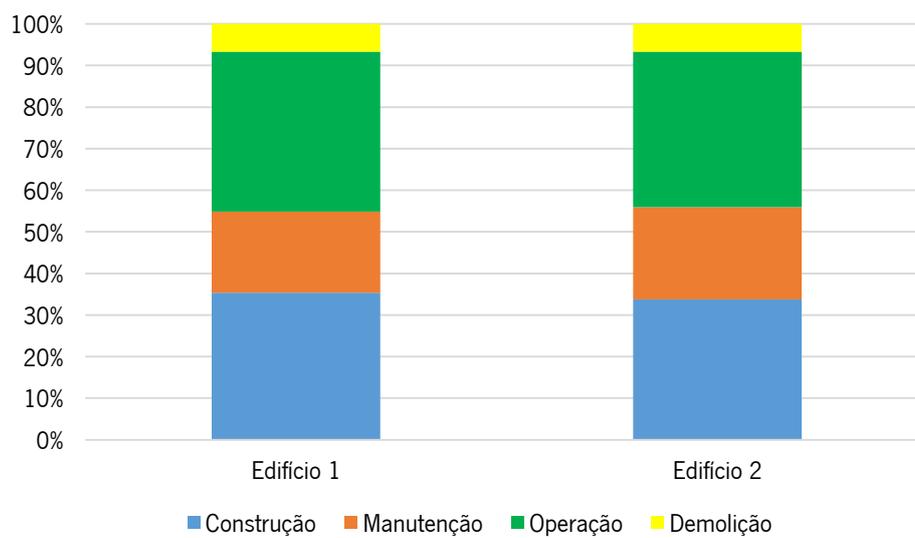


Figura 64 – Contributo das várias fases para o custo de ciclo de vida dos edifícios

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

6.1. Discussão dos Resultados

Analisando os valores obtidos com a aplicação da metodologia MARS-SC às quatro soluções de paredes exteriores verifica-se que de acordo com os parâmetros analisados, a Parede 2 (alvenaria estrutural com aplicação do Bloco BEST) é a mais sustentável, situando-se opostamente à Parede 3 (em betão armado) que é a menos sustentável. Na Tabela 64 são organizadas as quatro soluções estudados por ordem decrescente de sustentabilidade.

Tabela 64 – Organização das soluções por ordem decrescente de sustentabilidade

Parede 2	Mais sustentável
Parede 1 (Referência)	↑
Parede 4	
Parede 3	Menos sustentável

A **Parede 2** é a que tem melhor desempenho ambiental, sendo a melhor solução em quatro dos seis parâmetros analisados. Para além disso possibilita que os potenciais impactes ambientais sejam muito inferiores relativamente à pior solução em todos os parâmetros. A melhoria situa-se entre os 62% no GWP e os 107% no caso do EP. No indicador funcional verifica-se que é a terceira melhor, uma vez que ao nível do desempenho térmico esta solução é pior que as Paredes 1 e 4, enquanto no desempenho acústico as Paredes 1 e 3 são melhores. Ao nível do comportamento económico verifica-se que tem um custo de construção cerca de 6,5% superior à melhor solução e que permite uma poupança de 64 euros/m² relativamente à Parede 3 (pior solução). Outro aspeto importante e que não se reflete neste estudo é o facto de uma parte significativa do custo da parede ser investido em mão-de-obra em detrimento dos materiais, isto devido à maior exigência na aplicação do ETICS, quando comparado com o reboco tradicional. Assim, conclui-se que os aspetos que mais contribuem para que a solução Alvest seja mais sustentável são principalmente: o bom desempenho ambiental, uma vez que na normalização apresenta valores entre 0,81 e 1 para todas as categorias de impacte ambiental; e o facto de o custo de construção ser competitivo, comparativamente com a solução convencional.

A **Parede 1**, que foi considerada como referência, é a segunda mais sustentável devido principalmente ao seu baixo custo de construção. Em termos funcionais, nos dois parâmetros analisados esta apresenta-se como a segunda melhor, atrás da Parede 4 no desempenho térmico e da Parede 3 no desempenho acústico. No indicador ambiental esta é a pior solução, tendo uma média de 70% de maiores impactes quando comparada com a melhor solução de cada indicador. O principal responsável é o tijolo cerâmico, que devido ao seu processo construtivo é dos materiais utilizados nesta solução o que provoca mais efeitos negativos sobre o meio ambiente. Quando comparado com o Bloco BEST, para a mesma área de parede o tijolo cerâmico mesmo apresentando menor massa acarreta mais 191% no ADP, 57% no GWP, 188% no ODP, 79% no AP, 202% no POCP e 72% no EP.

Analisando a terceira solução mais sustentável, a **Parede 4**, verifica-se que é a que apresenta melhor desempenho funcional, isto devido ao baixo coeficiente de transmissão térmica justificado pela elevada quantidade de isolamento aplicado no interior da parede e no ETICS. Por outro lado, esta quantidade de isolamento faz com que o desempenho ambiental piore, uma vez que depois do perfil em aço, os isolamentos utilizados são os que provocam maiores impactes em quatro dos parâmetros analisados (ADP, GWP, AP e POCP). À exceção do ODP, os perfis em aço são os que provocam maiores efeitos negativos sobre o ambiente, sendo que por outro lado têm um potencial de reutilização e reciclagem muito superior aos materiais utilizados nas outras soluções. Na dimensão económica a solução tem um desempenho ligeiramente superior à Parede 3 e muito inferior que as restantes, sendo que a sua construção custa mais 75% do que a Parede 1.

A parede menos sustentável, **Parede 3**, é a que apresenta pior desempenho em termos económicos, com o maior custo de construção. No indicador funcional exhibe um mau comportamento térmico, contudo devido à elevada massa, é a que consegue melhores características acústicas. Ao nível ambiental a solução é a segunda pior, sendo que o EPS é o material que mais contribui para o POCP, enquanto nos restantes parâmetros o responsável pelos maiores impactes é o betão.

Verificando que a comparação ao nível da solução construtiva permite concluir que as duas mais sustentáveis são a parede resistente em alvenaria estrutural e a parede dupla de tijolo cerâmico, procedeu-se à sua comparação quando aplicadas em edifícios de habitação. Em termos

funcionais verifica-se que o edifício em alvenaria estrutural (Edifício 2) tem menores necessidades energéticas. O facto da parede utilizada neste edifício ter um coeficiente global de transmissão térmica superior, é compensado pela maior área de elementos estruturais no Edifício 1, tal como pelo pior desempenho térmico nessas zonas.

Analisando o indicador ambiental de cada uma das habitações verifica-se que, na totalidade do ciclo de vida, o Edifício 2 tem um maior impacte no ODP e, em contrapartida, apresenta um comportamento melhor em todos os restantes parâmetros, permitindo em cada um deles uma diminuição dos impactes em cerca de 5%. Dividindo os valores pelas várias fases do ciclo de vida tal como foi feito na Figura 56, é possível verificar que à exceção do ODP, a fase de operação é destacadamente a responsável pelos maiores impactes ambientais, correspondendo a mais de 75% dos impactes de ciclo de vida. O ODP (potencial de destruição da camada de ozono) apresenta um comportamento dispar dos restantes devido à grande influência que os plásticos têm neste parâmetro. O único material plástico utilizado é o XPS que é aplicado apenas na fase de construção, sendo que por ser aplicada uma maior espessura, o Edifício 2 tem maior impacte. Assim sendo, e com o objetivo de diminuir os impactes relativos à sua construção, poderia substituir-se o XPS por placas de cortiça com a mesma espessura, sendo que essa alteração não introduziria mudanças relativamente às características térmicas da solução (uma vez que têm a mesma condutibilidade térmica). Por outro lado, e tal como representado no Anexo 4, mesmo a cortiça tendo um peso específico superior (90 Kg/m^3), os impactes deste material na generalidade são consideravelmente inferiores, chegando a uma diminuição superior a 71% e 99% no caso do GWP e ODP, respetivamente.

Ao nível da dimensão económica verifica-se que no edifício com estrutura porticada em betão armado (Edifício 1), dos 295353,5 euros gastos em todo o ciclo de vida, 35% são aplicados na sua construção, 20% na manutenção, 38% na fase de operação e 7% na deposição dos materiais no final do ciclo de vida. No Edifício 2 são gastos 290749,8 euros, dos quais 34% são investidos na construção, 22% na manutenção, 37% na operação e 7% na fase de deposição. Este sistema construtivo permite uma poupança ao longo do ciclo de vida de aproximadamente 1,6%, em relação ao edifício de referência. A fase de manutenção é a única que acarreta maiores custos no Edifício 2, sendo de aproximadamente mais 11% que o Edifício 1, essencialmente devido aos maiores custos de manutenção do reboco armado (utilizado no ETICS), quando comparado com

os do reboco tradicional. Por outro lado, as fases de construção e operação permitem uma poupança de 6,6% e 4,5%. Na última fase, na deposição dos materiais, a poupança é de 1,8%.

6.2. Conclusão

A construção em Portugal caminha no sentido contrário aos objetivos da Construção Sustentável, continuando a viver muito dependente de matérias primas provenientes da indústria extrativa. A exploração de rochas como granito ou calcário é quase na totalidade aplicada neste setor. Para além disso, ainda são utilizados em grande quantidade materiais cuja produção exige consumos de energia elevados como por exemplo o cimento, a cal e o tijolo cerâmico.

Quando se equaciona a construção de uma habitação a principal preocupação é cumprir com as exigências regulamentares tendo o menor custo possível com a conceção e construção. Contudo, este estudo permitiu comprovar que esse pensamento deve ser alterado, a fase de construção tem um peso de apenas um terço do custo associado ao ciclo de vida do edifício. Assim sendo, deve ser feito um maior investimento na conceção do imóvel, que levará à otimização funcional do edifício, e irá proporcionar um melhor desempenho económico e ambiental. A exigência de menos manutenção leva a menores custos e impactes decorrentes da substituição de materiais, da mesma forma que na operação diminuirá a dependência de energia. Desta forma, para além do investimento inicial ser rapidamente recuperado, permite a que a habitação tenha um melhor desempenho contribuindo para a otimização das três dimensões de Sustentabilidade.

Apesar de no presente estudo não ter sido possível comparar edifícios com as mesmas características (tipo de isolamento, área de envidraçados e área bruta), os resultados obtidos permitem concluir que a alvenaria estrutural é uma solução construtiva que aproxima a construção dos objetivos do desenvolvimento sustentável. Isto porque, cumpre com as exigências funcionais aplicáveis, apresenta custos competitivos em relação aos convencionais e produz menores efeitos negativos sobre o meio ambiente. Para além das vantagens demonstradas nos estudos, a alvenaria estrutural permite um faseamento construtivo simplificado e rápido, uma vez que não introduz grandes alterações em termos de qualificação da mão de obra quando comparada com o betão armado. Por outro lado, permite uma redução dos desperdícios e improvisações devido à utilização de unidades com geometria regular e padronizada. A construção com a aplicação deste sistema necessita de uma quantidade de

cofragens muito inferior quando comparado com o convencional, o que permite reduzir os impactes associados à sua utilização.

O aumento da aplicação deste método construtivo certamente que suscitará o interesse por parte dos fabricantes, o que levará à diminuição do preço de venda de cada unidade de alvenaria e também ao investimento na sua otimização, permitindo a melhoria quer do desempenho funcional quer do ambiental.

6.3. Desenvolvimentos Futuros

A temática da construção sustentável e o seu alcance permitem definir vários pontos de orientação para trabalhos futuros, por forma a colmatar alguns aspetos que ficaram em aberto nesta investigação.

A um nível mais restritivo tem interesse o investimento no estudo e otimização do bloco de alvenaria, por exemplo através da incorporação de materiais regeneráveis que permitam diminuir os impactes relacionados por exemplo com a utilização do cimento, e em simultâneo melhorar as características térmicas. Essa otimização também poderá ser feita recorrendo à incorporação de subprodutos da construção e demolição, que para além de incentivar a reutilização de materiais, e conseqüente diminuição da exploração de outros, poderia proporcionar a diminuição do preço de venda do bloco. Este conjugado de características deve sempre ser analisado tendo em conta a necessidade de manter as características estruturais necessárias.

Nos sistemas construtivos deverão ser desenvolvidas análises de ciclo de vida baseadas em edifícios similares, desde o tipo de isolamento (por exemplo ambos com parede simples recorrendo ao ETICS), a área de envidraçados ou a divisão dos espaços interiores. Por outro lado, e dado o potencial demonstrado pela alvenaria estrutural com aplicação do Bloco BEST, tem interesse o estudo do seu desempenho em edifícios de maior porte (3 ou 4 pisos), para atestar se a alteração da dimensão dos edifícios altera o seu comportamento relativamente ao sistema construtivo convencional.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Alves, J. (2011). Desempenho sísmico de estruturas de Alvenaria de blocos de betão. Dissertação de Mestrado em Construção e Reabilitação Sustentáveis. Universidade do Minho, Guimarães, Portugal.

Bragança, L. (2008). Avaliação da Sustentabilidade de Edifícios. Seminário Green It. INETI, Lisboa.

Bragança, L.; Mateus, R. (2011). Avaliação do ciclo de vida de edifícios - impacte ambiental de soluções construtivas.

Brundtland, G. (1987). *Our common future: The world commission on environment and development*. Oxford University Press. Oxford, UK.

EN1998-1 (2010). Eurocódigo 8 - Projecto de estruturas para resistência aos sismos: Parte 1:Regras gerais, acções sísmicas e regras para edifícios. LNEC, Lisboa, Portugal.

Gouveia, J.; Lourenço, P. (2006). Avaliação do comportamento de paredes de alvenaria com blocos de betão leve. 4as Jornadas Portuguesas de Engenharia de Estruturas. LNEC, Lisboa, Portugal.

Gouveia, J.; Lourenço, P.; Vasconcelos, G.; (2007). Soluções construtivas em alvenaria. Congresso Construção 2007 - 3.º Congresso Nacional. Universidade de Coimbra, Coimbra, Portugal.

Haach, V. (2009). *Development of a design method for reinforced masonry subjected to in-plane loading based on experimental and numerical analysis*. Universidade do Minho, Guimarães, Portugal.

Haach, V.G.; Vasconcelos, G.; Lourenço, P.B. (2010). *Experimental analysis of reinforced concrete block masonry walls subjected to in-plane cyclic loads*, *ASCE, Journal of Structural Engineering*, 136(4), 452-462.

Intergovernmental Panel on Climate Change. *Presentation of the IPCC Fifth Assessment Report 2015: Synthesis Report*. [Online] [Citação: 23 de Fevereiro de 2015.] <http://www.ipcc.ch>.

ISO 14040 (1997). *Environmental management - Life cycle assessment - Principles and framework*. Genève, Suíça.

Perret J. (1995). *Guide de la maintenance des bâtiments*. Éditions Le Moniteur. Paris, França.

Kibert, C. (1994). *Establishing Principles and Model for Sustainable Construction*. Proceedings of the First International Conference of CIB TG 16. Tampa, EUA.

Kibert, C. (2012). *Sustainable Construction: Green Building Design and Delivery*. John Wiley & Sons, Inc. New Jersey, EUA.

Lourenço, P.B.; Avila, L.; Vasconcelos G.; Alves, P.; Mendes N.; Campos Costa A. (2013). *Experimental investigation on the seismic performance of masonry buildings using shaking table testing*, *Bulletin of Earthquake Engineering*, 11(4), 1157-1190.

Lourenço, P.B.; Vasconcelos, G.; Medeiros, P.; Gouveia, J. (2010). *Vertically perforated clay brick masonry for loadbearing and non-loadbearing masonry walls*, *Construction and Building Materials*, 24 (11), 2317-2330.

Marques, R.; Vasconcelos G.; Lourenço, P.B. (2012), *Pushover analysis of a modern aggregate of masonry buildings through macro-element modelling*, *15th International Brick and Block Masonry Conference*, 4-6 June. Florianópolis, Brazil.

Mateus, R. (2004). *Novas tecnologias construtivas com vista à sustentabilidade da construção*. Tese de Mestrado em Engenharia Civil. Universidade do Minho, Guimarães, Portugal.

Mateus, R. (2009). *Avaliação da Sustentabilidade da Construção, Propostas para o desenvolvimento de Edifícios mais Sustentáveis*. Tese de Doutoramento Engenharia Civil/Processos de Construção. Universidade do Minho, Guimarães, Portugal.

Meisser, M. (1973). *Acustica de los Edificios*. Editores Técnicos Associados, S.A.. Barcelona, Espanha.

Mosele, F.; Modena, C.; Di Fusco, A.; Di Cesare, G.; Vasconcelos, G.; Haach, V.; Lourenço, P.; Beer, I.; Schmidt, U.; Brameshuber, W.; Scheufler, W.; Schermer, D.; Zilch, K. (2006). *Developing Innovative Systems for Reinforced Masonry Walls*. *International Masonry Conference*. London, UK.

Pinheiro, M. (2006). *Ambiente e Construção Sustentável*. Amadora, Portugal.

Projecto Alvest (2013). *Projecto 5456_Alvest - Desenvolvimento de soluções de Paredes em Alvenaria Estrutural*. Relatório técnico D5.2 e D5.3, Dimensionamento e construção de um edifício: aplicação ao caso de estudo; Avaliação da tecnologia de construção; Linhas gerais de organização e construção.

TORGAL, F.; JALALI, S. (2010). *A Sustentabilidade dos Materiais de Construção*. Edição TecMinho. Guimarães, Portugal.

USEPA (2001). *U.S. Environmental Protection Agency and Science Applications International Corporation*. LCAccess - LCA 101.

ANEXOS

Anexo 1 – Caracterização térmica de cada solução de parede exterior

Tabela 65 – Caracterização térmica da Parede 1 (referência)

Material	Espessura (m)	λ (W/m ² .°C)	R (m ² .°C/W)	U (W/m ² .°C)
Rsi	-	-	0,13	0,40
Reboco tradicional	0,015	1,3	0,01	
Tijolo 11	0,11	-	0,27	
EPS	0,06	0,04	1,50	
Caixa de ar	0,02	-	0,18	
Tijolo 15	0,15	-	0,39	
Reboco tradicional	0,015	1,3	0,01	
Rse	-	-	0,04	

Tabela 66 - Caracterização térmica da Parede 2

Material	Espessura (m)	λ (W/m ² .°C)	R (m ² .°C/W)	U (W/m ² .°C)
Rsi	-	-	0,13	0,45
Reboco tradicional	0,015	1,3	0,01	
Bloco BEST	0,2	-	0,52	
EPS	0,06	0,04	1,50	
Reboco armado	0,005	1,3	0,00	
Rse	-	-	0,04	

Tabela 67 - Caracterização térmica da Parede 3

Material	Espessura (m)	λ (W/m ² .°C)	R (m ² .°C/W)	U (W/m ² .°C)
Rsi	-	-	0,13	0,56
Reboco tradicional	0,015	1,3	0,01	
Betão armado	0,2	2	0,10	
EPS	0,06	0,04	1,50	
Reboco armado	0,005	1,3	0,00	
Rse	-	-	0,04	

Tabela 68 - Caracterização térmica da Parede 4

Material	Espessura (m)	λ (W/m ² .°C)	R (m ² .°C/W)	U (W/m ² .°C)
Rsi	-	-	0,13	0,18
Gesso laminado	0,015	0,25	0,06	
Lã mineral	0,15	0,04	3,75	
OSB	0,011	0,13	0,08	
EPS	0,06	0,04	1,50	
Reboco armado	0,005	1,3	0,00	
Rse	-	-	0,04	

Anexo 2 – Caracterização acústica de cada solução de parede exterior

Parede 1 – Parede dupla de tijolo furado

$$R(500\text{Hz}) = 14,3 \times \log(341,5) + 11,1 + 4 = 51 \text{ dB}$$

$$f_r = 66,31 \text{ Hz (Fora da zona audível)}$$

$$f_{c1} = 2000/15 = 133 \text{ Hz (quebra próxima de 6 dB, porque } f_{c1} \neq f_{c2})$$

$$f_{c2} = 2000/11 = 182 \text{ Hz (quebra próxima de 6 dB)}$$

Tendo em conta estes valores e aplicando o modelo de previsão, a curva desenvolve-se de acordo com a Figura 65. Fazendo o ajuste da curva de referência com a curva da parede verifica-se que o índice de redução acústica (R_w) da Parede 1 é de 53 dB.

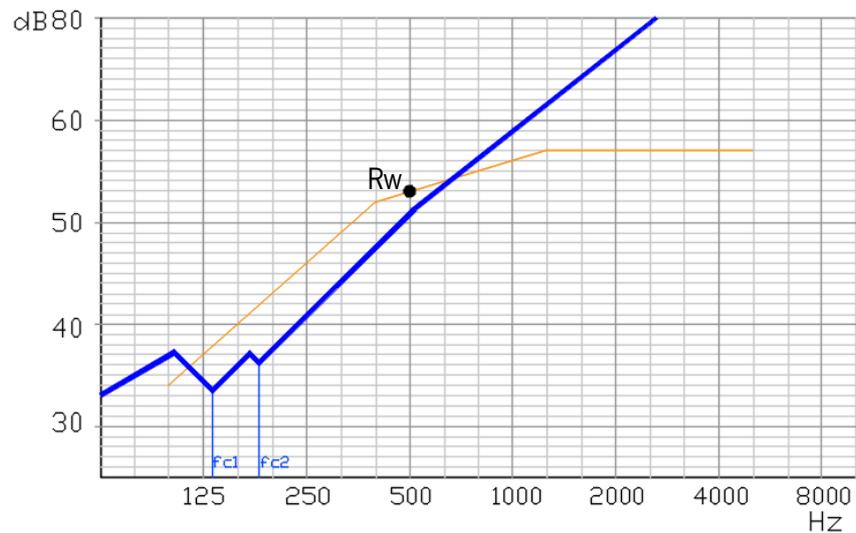


Figura 65 – Processo de cálculo do índice de redução sonora (R_w) para a Parede 1

Parede 2 – Parede em alvenaria estrutural com aplicação do Bloco BEST

$$R(500\text{Hz}) = 14,3 \times \log (259,8) + 11,1 = 46 \text{ dB}$$

$$f_c = 3200/20 = 160 \text{ Hz (quebra próxima de 9 dB)}$$

Tendo em conta estes valores e aplicando o modelo de previsão, a curva desenvolve-se de acordo com a Figura 66. Fazendo o ajuste da curva de referência com a curva da parede verifica-se que o índice de redução acústica (R_w) da Parede 2 é de 49 dB.

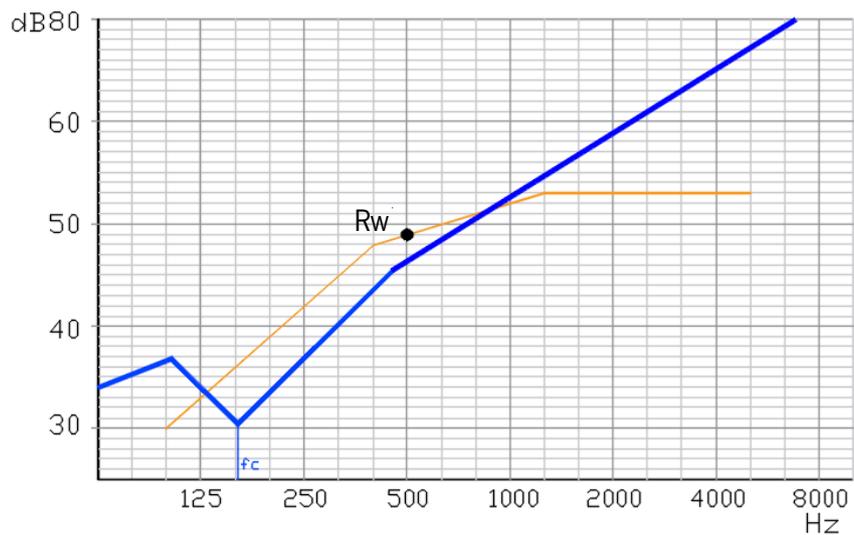


Figura 66 – Processo de cálculo do índice de redução sonora (R_w) para a Parede 2

Parede 3 – Parede em betão armado

$$R(500\text{Hz}) = 14,3 \times \log(540,6) + 11,1 = 50 \text{ dB}$$

$$f_c = 1800/20 = 90 \text{ Hz (quebra próxima de 8 dB)}$$

Tendo em conta estes valores e aplicando o modelo de previsão, a curva desenvolve-se de acordo com a Figura 67. Fazendo o ajuste da curva de referência com a curva da parede verifica-se que o índice de redução acústica (R_w) da Parede 3 é de 56 dB.

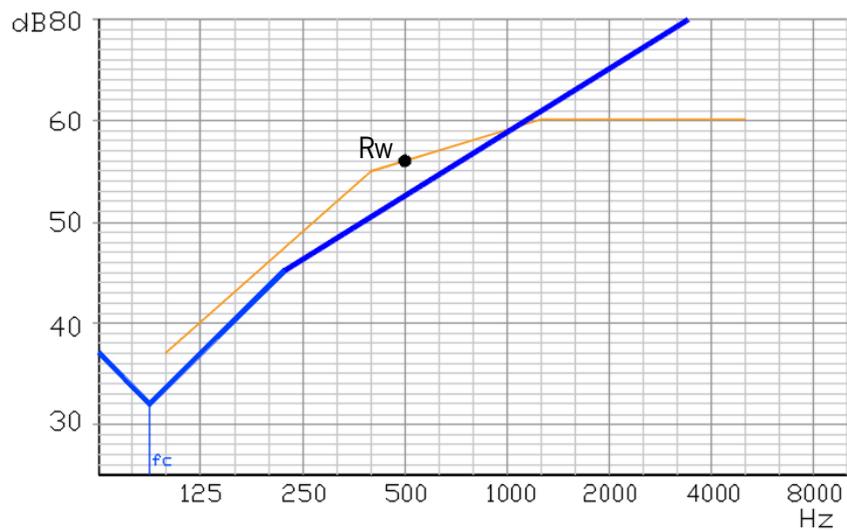


Figura 67 – Processo de cálculo do índice de redução sonora (R_w) para a Parede 3

Parede 4 – Parede com estrutura em aço leve

$$R(500\text{Hz}) = 13,3 \times \log(44,5) + 13,4 + 6 = 41 \text{ dB}$$

Uma vez que a caixa de ar é de grandes dimensões e está totalmente preenchida com material absorvente (lã mineral) admitiu-se uma diferença de isolamento (Dif.) superior à da Parede 1.

$$f_{c1} = 4000/1,5 = 2667 \text{ Hz}$$

$$f_{c2} = 18000/1,1 = 16364 \text{ Hz}$$

Tendo em conta estes valores e aplicando o modelo de previsão, a curva desenvolve-se de acordo com a Figura 68. Fazendo o ajuste da curva de referência com a curva da parede verifica-se que o índice de redução acústica (R_w) da Parede 4 é de 45 dB.

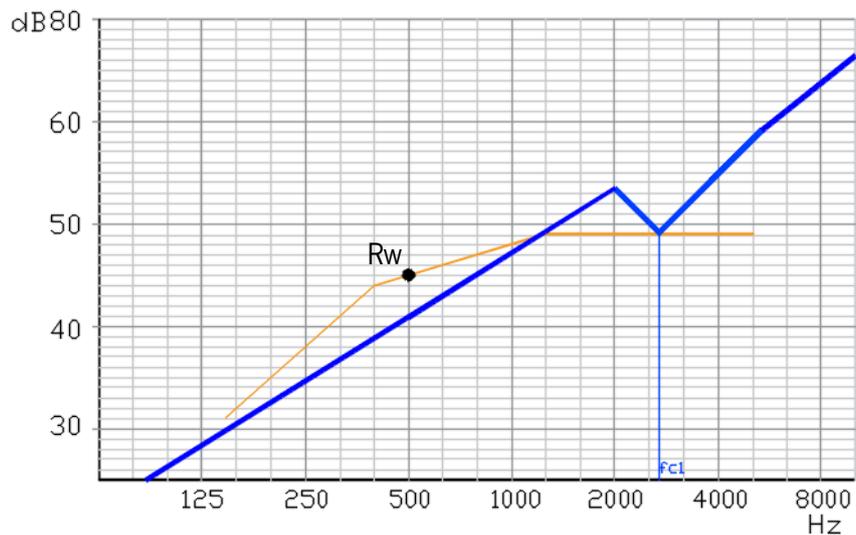


Figura 68 – Processo de cálculo do índice de redução sonora (R_w) para a Parede 4

Anexo 3 – Caracterização térmica dos elementos construtivos

Paredes Exteriores

Edifício 1

Tabela 69 – Caracterização térmica da parede exterior do Edifício 1

Material	Espessura (m)	λ (W/m ² .°C)	R (m ² .°C/W)	U (W/m ² .°C)
Rsi	-	-	0,13	0,47
Reboco tradicional	0,015	1,3	0,01	
Tijolo 11	0,11	-	0,27	
XPS	0,04	0,037	1,08	
Caixa-de-ar	0,02	-	0,18	
Tijolo 15	0,15	-	0,39	
Reboco tradicional	0,015	1,3	0,01	
Rse	-	-	0,04	

Edifício 2

Tabela 70 – Caracterização térmica da parede exterior do Edifício 2

Material	Espessura (m)	λ (W/m ² .°C)	R (m ² .°C/W)	U (W/m ² .°C)
Rsi	-	-	0,13	0,49
Reboco tradicional	0,015	1,3	0,01	
Bloco BEST	0,2	-	0,52	
XPS	0,05	0,037	1,35	
Reboco armado	0,005	1,3	0,00	
Rse	-	-	0,04	

Pontes Térmicas

Edifício 1 – Pilares

Tabela 71 – Caracterização térmica dos pilares do Edifício 1

Material	Espessura (m)	λ (W/m ² .°C)	R (m ² .°C/W)	U (W/m ² .°C)
Rsi	-	-	0,13	0,72
Reboco tradicional	0,015	1,3	0,01	
Betão	0,25	2	0,125	
Manta térmica (XPS)	0,04	0,037	1,08	
Reboco tradicional	0,015	1,3	0,01	
Rse	-	-	0,04	

Edifício 1 – Vigas

Tabela 72 – Caracterização térmica das vigas do Edifício 1

Material	Espessura (m)	λ (W/m ² .°C)	R (m ² .°C/W)	U (W/m ² .°C)
Rsi	-	-	0,13	0,72
Reboco tradicional	0,015	1,3	0,01	
Betão	0,25	2	0,125	
Manta térmica (XPS)	0,04	0,037	1,08	
Reboco tradicional	0,015	1,3	0,01	
Rse	-	-	0,04	

Edifício 2 – Vigas

Tabela 73 – Caracterização térmica das vigas do Edifício 2

Material	Espessura (m)	λ (W/m ² .°C)	R (m ² .°C/W)	U (W/m ² .°C)
Rsi	-	-	0,13	0,61
Reboco tradicional	0,015	1,3	0,01	
Bloco lintel cheio de betão	0,20	2	0,1	
XPS	0,05	0,037	1,35	
Reboco armado	0,005	1,3	0	
Rse	-	-	0,04	

Edifício 1 e Edifício 2 - Caixas de estore

Tabela 74 – Caracterização térmica das caixas de estore (Edifício 1 e 2)

Material	Espessura (m)	λ (W/m ² .°C)	R (m ² .°C/W)	U (W/m ² .°C)
Rsi	-	-	0,13	0,93
Reboco tradicional	0,015	1,3	0,01	
Caixa de estore em EPS	0,03	0,037	0,81	
Rse	-	-	0,13	

Anexo 4 – Impactes referentes à utilização do XPS e da cortiça

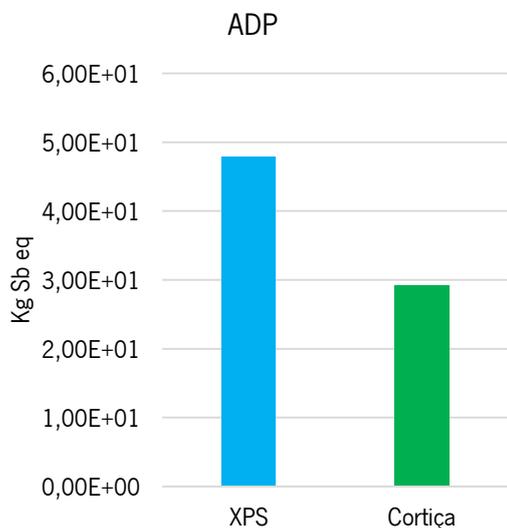


Figura 69 – Comparação do ADP entre o XPS e a cortiça

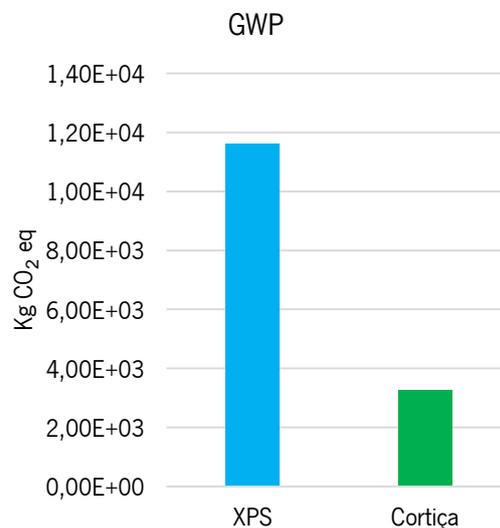


Figura 70 – Comparação do GWP entre o XPS e a cortiça

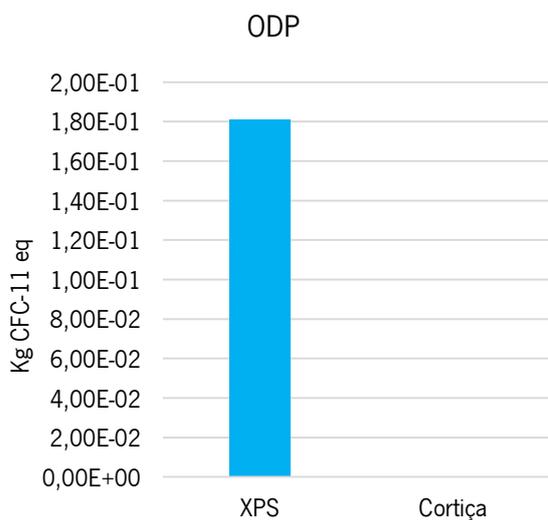


Figura 71 – Comparação do ODP entre o XPS e a cortiça

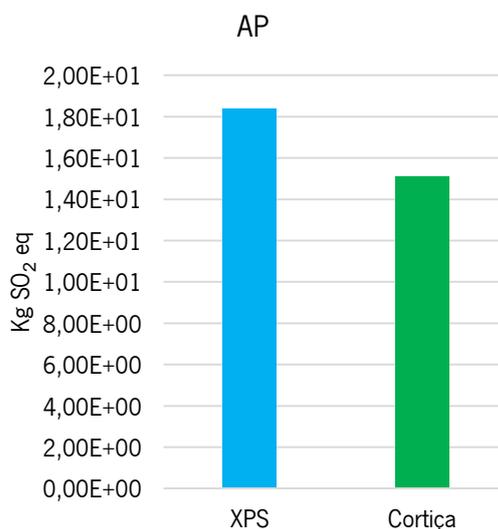


Figura 72 – Comparação do AP entre o XPS e a cortiça

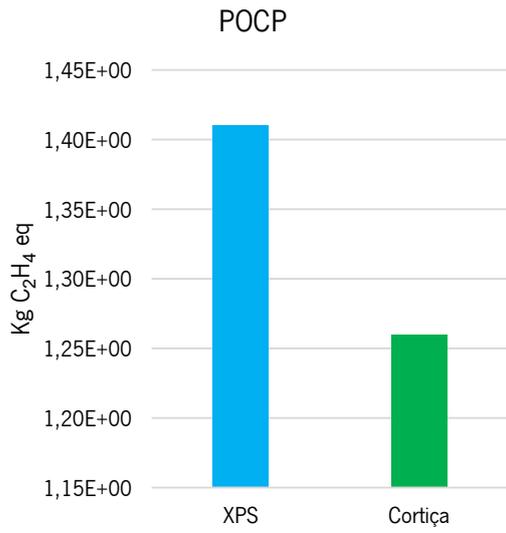


Figura 73 – Comparação do POCP entre o XPS e a cortiça

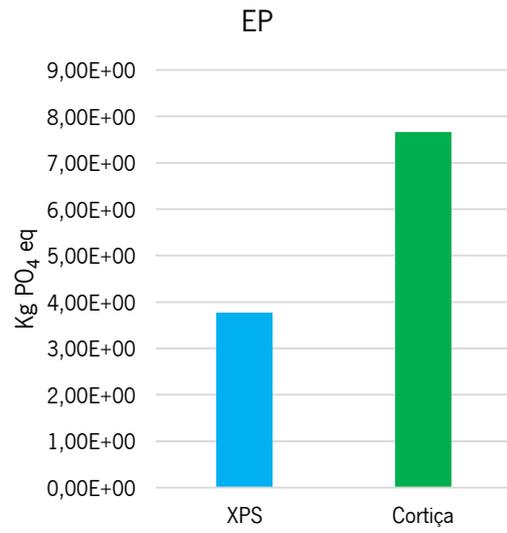


Figura 74 – Comparação do EP entre o XPS e a cortiça