



**Universidade do Minho**  
Escola de Engenharia

Ana Carolina Fernandes Coelho

**A Sustentabilidade do  
Uso da Madeira na Construção**

Tese de Mestrado  
**Construção e Reabilitação Sustentáveis**

Trabalho efetuado sob a orientação do  
**Professor Doutor Jorge Manuel Branco**

E co-orientação da  
**Professora Doutora Helena Gervásio**

Julho de 2012



## **AGRADECIMENTOS**

Este trabalho não teria sido possível sem a ajuda e a partilha de conhecimentos por parte dos meus orientadores: Professor Jorge Branco, da Universidade do Minho, e Professora Helena Gervásio, da Universidade de Coimbra.

A ambos agradeço o apoio e a crítica em todas as fases do trabalho. Expresso o meu especial agradecimento ao Professor Jorge Branco, pela inextinguível disponibilidade, cooperação e motivação.

Agradeço aos meus colegas e professores do Mestrado em Construção e Reabilitação Sustentáveis, que me proporcionaram dois interessantes anos de troca de conhecimentos e experiências. Também à Catarina, à Tuxa e ao Adriano, pela discussão e partilha nos vários momentos do trabalho.

Por fim, agradeço à minha família, especialmente aos meus pais e ao Zé, sem os quais nada seria possível.



## **RESUMO**

O presente trabalho aponta ao objetivo geral de explorar o potencial do uso da Madeira na Construção, sob a perspectiva da sustentabilidade e dos atuais métodos de Avaliação de Ciclo de Vida (ACV).

Apresenta-se um enquadramento preliminar, que pretende situar a madeira nas várias dimensões e linhas de orientação para a Sustentabilidade da Construção.

Em seguida, avaliam-se as possibilidades e limitações das Avaliações de Ciclo de Vida de edifícios de madeira, através da sua aplicação a casos de estudo segundo duas diferentes abordagens: a primeira estabelece uma comparação (ambiental e económica) entre dois sistemas estruturais: madeira e aço leve; a segunda, quantifica exaustivamente os impactos ambientais de uma solução-base, que é de seguida sujeita a uma análise de sensibilidade para aferição de quais as variáveis que provocam as maiores variações nos resultados da ACV.

Por fim, em resultado da experimentação efectuada, apresenta-se uma lista de contributos para a formulação de uma Metodologia de Avaliação da Sustentabilidade adaptada às particularidades dos edifícios de madeira.

## **ABSTRACT**

This research work points to the main goal of exploring the potential associated with timber construction, under a Sustainability point of view, along with the available Life-cycle Assessment (LCA) methods.

It starts with a state-of-the art that contextualizes timber in the three dimensions of sustainable development, and presents a guideline for a more sustainable construction industry.

The possibilities and constraints of the LCA, applied to timber buildings, are assessed through two different case studies: the first one is a comparative assessment, which aims to compare timber frame and light steel framing as a structural option to a single-family house; on the second one, a single project is assessed in detail, performing a sensitivity analysis in order to determine which life-cycle options (end-of-life, transport...) produce the most noticeable impacts.

As a summary, at the end of the essay some contributions are given, in order to a future definition of a Sustainability Assessment method that can be fully suitable for timber buildings.



## ÍNDICE

<b>1. MOTIVAÇÃO, OBJECTIVOS E ENQUADRAMENTO .....</b>	<b>17</b>
1.1 Introdução .....	17
1.2 Enquadramento .....	18
1.2.1 A Sustentabilidade da Construção .....	18
1.2.2 O Papel da Madeira na Sustentabilidade da Construção .....	20
1.3 Motivos e Objectivos da dissertação .....	29
1.4 Organização da Dissertação .....	30
<b>2. LINHAS DE ORIENTAÇÃO PARA A SUSTENTABILIDADE DA CONSTRUÇÃO .....</b>	<b>33</b>
2.1 Materiais de construção .....	33
2.2 Pré-Fabricação, Reciclagem e Reutilização .....	35
2.3 Síntese do capítulo .....	39
<b>3. METODOLOGIAS PARA AVALIAÇÃO DA SUSTENTABILIDADE .....</b>	<b>41</b>
3.1 Avaliação de Ciclo de Vida .....	42
3.2 Avaliação de Ciclo de Vida aplicada a Edifícios .....	44
3.2.1 Avaliação de Ciclo de Vida de Edifícios de Madeira .....	46
3.3 Programa informático de ACV - BEES .....	50
3.4 Sentido de Evolução das Metodologias de ACV .....	51
3.5 Síntese do Capítulo .....	53
<b>4. CASO DE ESTUDO 1.....</b>	<b>55</b>
4.1 Análise de Ciclo de Vida de uma habitação unifamiliar, com base no software <i>BEES</i> .....	55
4.1.1 Categorias de Impacto Ambiental .....	59
4.1.2 Análise de inventário .....	65
4.1.3 Desempenho Ambiental da Solução .....	79
4.2 Desempenho Ambiental da Solução Alternativa, com Estrutura em Aço Enformado a Frio.....	88
4.3 Análise económica .....	90
4.4 Comparação das duas soluções .....	91
4.5 Discussão de resultados .....	93

<b>5. CASO DE ESTUDO 2.....</b>	<b>95</b>
5.1 Objectivos e âmbito do estudo.....	95
5.2 Análise de Inventário para o Ciclo de Vida .....	98
5.2.1 Cenários de fim-de-vida .....	105
5.3 Análise de Sensibilidade .....	107
5.4 Avaliação dos Impactos de Ciclo de Vida.....	109
5.5 Discussão de resultados .....	115
<b>6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES .....</b>	<b>117</b>
6.1 Fatores a considerar na avaliação da sustentabilidade de edifícios de madeira.....	117
6.1.1 Armazenamento de Dióxido de Carbono .....	117
6.1.2 Fronteiras do sistema .....	118
6.1.3 Dimensão Social da Sustentabilidade .....	120
6.1.4 Síntese .....	121
6.2 Conclusões.....	122
6.3 Recomendações para trabalhos futuros.....	123
<b>7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>125</b>
<b>8. ANEXOS.....</b>	<b>129</b>



## LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1 - Factores de Caracterização para a categoria de impacto "Aquecimento Global" .....	60
Tabela 4.2 - Factores de Caracterização para a categoria de impacto "Potencial de Acidificação" ..	60
Tabela 4.3 - Factores de Caracterização para a categoria de impacto "Eutrofização".....	61
Tabela 4.4 - Factores de Caracterização para a categoria de impacto "Esgotamento dos Combustíveis Fósseis" .....	61
Tabela 4.5 - Factores de Caracterização para a categoria de impacto "Alteração dos Habitats".....	62
Tabela 4.6- Factores de Caracterização para a categoria de impacto "Saúde Humana”.....	63
Tabela 4.7 - Factores de Caracterização para a categoria de impacto "Smog" .....	63
Tabela 4.8 - Factores de Caracterização para a categoria de impacto "Destruição da Camada de Ozono" .....	64
Tabela 4.9 – Valores de normalização para cada categoria de impacto .....	64
Tabela 4.10 - Categorias de Impacto consideradas.....	65
Tabela 4.11 – Quantificação dos Impactos ambientais da laje do piso térreo .....	79
Tabela 4.12 - Quantificação dos impactos associados com os materiais incluídos na laje de separação interior dos dois pisos da habitação .....	80
Tabela 4.13 - Quantificação dos Impactos Ambientais associados aos materiais incluídos na laje de separação entre o piso 1 (interior) e o piso 0 (exterior).....	81
Tabela 4.14 - Quantificação dos Impactos Ambientais associados aos materiais incluídos na laje de cobertura (não-visitável).....	82
Tabela 4.15 - Quantificação dos Impactos Ambientais relacionados com os materiais incluídos na laje de terraço da habitação.....	83
Tabela 4.16 - Quantificação dos Impactos Ambientais associados aos materiais incluídos nas paredes exteriores da habitação .....	84
Tabela 4.17 - Quantificação dos Impactos Ambientais associados aos materiais incluídos nas paredes interiores da habitação .....	85
Tabela 4.18 - Quantificação dos Impactos Ambientais associados à estrutura de madeira da habitação .....	86
Tabela 4.19 - Quadro-resumo dos Impactos Ambientais associados a cada elemento construtivo considerado .....	87
Tabela 4.20 - Quadro-resumo dos Impactos Ambientais associados a cada elemento construtivo considerado na solução “Aço enformado a frio”.....	89
Tabela 4.21 - Balanço económico da solução com estrutura em madeira (\$) .....	91
Tabela 4.22 - Balanço económico da solução com estrutura em aço enformado a frio (\$).....	91
Tabela 5.1 - Resumo dos cenários de fim-de-vida considerados.....	105
Tabela 5.2 - Inventário de materiais para o primeiro cenário de fim-de-vida definido (Cenário 1)	106
Tabela 5.3 - Inventário de materiais considerados no segundo cenário de fim-de-vida (Cenário 2) .....	107
Tabela 5.4 - Inventário de materiais considerados no terceiro cenário de fim-de-vida (Cenário 3)	107
Tabela 5.5 - Quadro-resumo das variáveis analisadas .....	108
Tabela 5.6 - Factores de normalização para as categorias de impacto consideradas.....	109
Tabela 5.7 - Resultados da ACV para a versão 1.....	109
Tabela 5.8 - Resultados obtidos na análise de sensibilidade efectuada, expressos em variação percentual relativamente à versão-base V1 (%) .....	110
Tabela 6.1 – Resumo das Categorias a considerar para Avaliação da Sustentabilidade de Edifícios de Madeira .....	121



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 - Exploração Florestal (fonte: <a href="http://www.fcl-ltd.com/">http://www.fcl-ltd.com/</a> ).....	21
Figura 1.2 - Processo de fotossíntese (fonte: Schmulsky & Jones, 2011) .....	23
Figura 1.3 - Modelação térmica, no software THERM, de duas paredes exteriores de composição idêntica, excepto a estrutura: madeira (esquerda) e aço leve (direita) (Fonte: Coelho e Lopes, 2012).....	24
Figura 1.4 - Madeira para exportação ilegal, apreendida num porto da Tanzânia (fonte: <a href="http://www.cept.net">www.cept.net</a> ).....	25
Figura 1.5 - Alvenaria estrutural em madeira (Silva et al., 2011).....	26
Figura 1.6 - Casa de Madeira no Japão, Arquitecto Sou Fujimoto (fonte: <a href="http://www.archdaily.com">www.archdaily.com</a> ) .....	27
Figura 1.7 - Casa em Madeira em Espanha (fonte: <a href="http://www.disdigs.com">www.disdigs.com</a> ).....	28
Figura 1.8 - Transporte de uma casa pré-fabricada com as dimensões de um contentor (fonte: <a href="http://www.modular-system.com">www.modular-system.com</a> ).....	29
Figura 1.9 - "Torre Turística Transportável (TTT), do Arq. José Pequeno, em transporte de Portugal para a China (fonte: <a href="http://www.tttower.com">www.tttower.com</a> ) .....	29
Figura 4.1 - Planta do piso térreo da habitação.....	56
Figura 4.2 - Planta do primeiro piso da habitação .....	57
Figura 4.3 - Alçados da habitação.....	57
Figura 4.4 - Zona residencial da cidade de Kiruna, Suécia (fonte: Google Maps).....	65
Figura 4.5 - Casa em Austin, Texas, Estados Unidos da América (fonte: <a href="http://www.theluxhome.com">www.theluxhome.com</a> ) ..	66
Figura 4.6 - Exemplo de Estrutura em madeira maciça (fonte: Rusticasa).....	66
Figura 4.7 - Exemplo de edifício construído com sistema estrutural em aço leve enformado a frio (fonte: <a href="http://pt.wikipedia.org">http://pt.wikipedia.org</a> ).....	68
Figura 4.8 - Gráfico de desempenho global (ambiental e económico) de vários produtos disponíveis no BEES para acabamento de pavimentos da habitação. ....	69
Figura 4.9 - Gráfico de desempenho global (ambiental e económico) de vários produtos disponíveis no BEES para isolamento térmico. ....	70
Figura 4.10 - Laje do piso térreo (sem escala).....	71
Figura 4.11 - Laje do primeiro piso em contacto com o exterior.....	72
Figura 4.12 - Laje de divisão entre o piso térreo e o primeiro piso (sem escala) .....	73
Figura 4.13 - Laje de cobertura não-acessível (sem escala). ....	74
Figura 4.14 - Laje de cobertura em terraço (sem escala) .....	76
Figura 4.15 - Esquema representativo da solução construtiva adoptada para as paredes exteriores (sem escala). ....	76
Figura 4.16 - Gráfico de desempenho global (ambiental e económico) de vários produtos disponíveis no BEES para compartimentação interior. ....	77
Figura 4.17 - Gráfico de desempenho global (ambiental e económico) de vários produtos disponíveis no BEES para fins estruturais.....	78
Figura 4.18 - Esquema da solução construtiva adoptada para as paredes interiores (sem escala)....	78
Figura 4.19 - Gráfico representativo dos impactos associados aos materiais incluídos na laje do piso térreo. ....	79
Figura 4.20 - Gráfico Representativo dos Impactos Ambientais associados aos materiais incluídos na laje de separação interior entre os dois pisos da habitação. ....	80
Figura 4.21 - Gráfico representativo do conjunto dos Impactos Ambientais associados aos materiais presentes na laje do piso 1 (interior) em contacto com o exterior no piso 0. ....	81
Figura 4.22 - Gráfico representativo do conjunto dos Impactos Ambientais associados aos materiais constituintes da laje de cobertura não-visitável. ....	82
Figura 4.23 - Gráfico representativo do conjunto dos Impactos Ambientais relacionados com os materiais constituintes da laje do terraço da habitação.....	83

Figura 4.24 - Gráfico representativo dos Impactos Ambientais associados aos materiais incluídos nas paredes exteriores da habitação.....	84
Figura 4.25 - Gráfico representativo dos Impactos Ambientais associados aos materiais incluídos nas paredes interiores da habitação.....	85
Figura 4.26 - Gráfico representativo dos impactos ambientais relacionados com a estrutura de madeira da habitação .....	86
Figura 4.27- Gráfico de síntese das Categorias de Impacto Ambiental associadas a cada elemento construtivo da solução com estrutura em madeira.....	87
Figura 4.28 - Gráfico de síntese dos resultados para as várias categorias de impacto ambiental associadas a cada elemento construtivo da solução com estrutura em aço enformado a frio. ...	89
Figura 4.29 - Comparação do desempenho ambiental das duas soluções em estudo .....	92
Figura 4.30 - Comparação do desempenho económico das duas soluções em estudo (Custo de Ciclo de Vida) .....	92
Figura 5.1 - Imagem da casa já finalizada, vista do logradouro (foto fornecida pelo fabricante) ....	96
Figura 5.2 - Sistema Estrutural da casa.....	97
Figura 5.3 - Fundações em betão (fonte: <a href="http://precast.org">http://precast.org</a> ).....	98
Figura 5.4 - Diagrama de comportamento térmico de uma parede exterior com estrutura e revestimento em madeira (Coelho e Lopes, 2012) .....	100
Figura 5.5 - Cedro vermelho do Canadá aplicado na fachada do Pavilhão do Canadá na Expo 2010 (foto de Katarina Stuebe, fonte: <a href="http://www.expo2010canada.gc.ca">http://www.expo2010canada.gc.ca</a> ).....	100
Figura 5.6 - Diagrama do ciclo de vida da casa em estudo, com indicação das quantidades de matérias-primas consideradas e respetivas distâncias de transporte para cada material .....	102
Figura 5.7 - Modelação do ciclo de vida da habitação, no software GaBi 4 (PE International, 2007) .....	103
Figura 5.8 - Modelação dos fluxos associados à pré-fabricação do edifício, no software GaBi (PE International, 2007).....	104
Figura 5.9 - Modelação do cenário 1 de fim-de-vida, no software GaBi (PE International, 2007). 106	
Figura 5.10 - Modelação do ciclo-de-vida da versão 1, no software GaBi (PE International, 2007) .....	108
Figura 5.11 - Resumo dos resultados relativos à categoria de impacto "Esgotamento Abiótico", para as 6 versões analisadas (kg Sb-Equiv.).....	111
Figura 5.12 - Resumo dos resultados relativos à categoria de impacto "Potencial de Acidificação", para as 6 versões consideradas (kg SO2-Equiv.).....	112
Figura 5.13 - Resumo dos resultados relativos à Categoria de Impacto "Potencial de Eutrofização", para as 6 versões consideradas (kg Phosphate-Equiv.) .....	112
Figura 5.14 - Resumo dos resultados relativos à Categoria de Impacto "Potencial de Aquecimento Global (100 anos)" para as 6 versões consideradas (kg CO2-Equiv.).....	113
Figura 5.15 - Resumo dos resultados relativos à categoria de impacto "Destrução da Camada de Ozono", para as 6 versões consideradas (kg R11-Equiv.).....	114
Figura 5.16 - Resumo dos resultados relativos à categoria de impacto "Potencial de Criação Fotoquímica de Ozono", para as 6 versões consideradas (kg Ethene-Equiv.).....	114
Figura 5.17 - Normalização dos resultados das 6 versões analisadas .....	115

## LISTA DE ACRÓNIMOS

**ACV** – Avaliação de Ciclo de Vida

**ADP** – Abiotic Depletion (em inglês), ou Esgotamento Abiótico (em português)

**AP** – Acidification Potential (em inglês), ou Potencial de Acidificação (em português)

**COV** – Compostos Orgânicos Voláteis

**EP** – Eutrophication Potential (em inglês), ou Potencial de Eutrofização (em português)

**GWP** – Global Warming Potential (em inglês), ou Potencial de Aquecimento Global (em português)

**LCA** – Life-cycle Assessment (em inglês), ou Avaliação de Ciclo de Vida (em português)

**LCC** – Life-cycle Cost (em inglês), ou Custo de Ciclo de Vida (em português)

**ODP** – Ozone Layer Depletion Potential (em inglês), ou Potencial de Destruição da Camada de Ozono (em português)

**OSB** – Oriented Strand Board (em inglês), ou Painéis de partículas orientadas (em português)

**POCOP** – Photochemical Ozone Creation Potential (em inglês), ou Potencial de Criação do Ozono Fotoquímico (em português)



# 1. MOTIVAÇÃO, OBJECTIVOS E ENQUADRAMENTO

## 1.1 Introdução

É notória a crescente preocupação da sociedade civil com as questões ambientais. Esta preocupação é simultaneamente a causa e a consequência de uma maior atenção dos media ao tema geral da “Sustentabilidade”, o que redundou no uso abusivo do termo, muitas vezes com fins comerciais e publicitários. Este cenário de mediatização da sustentabilidade justifica a necessidade urgente de objetivar os critérios e os métodos utilizados para a classificação dos bens e produtos de acordo com os seus impactos ambientais, sociais e económicos. De facto, são estes três “pilares” que sustentam o conceito mais abrangente de “Sustentabilidade” (Gervásio, 2010 e Mateus, 2009).

No que respeita à sustentabilidade da construção em particular, esta resulta da aplicação dos princípios do “Desenvolvimento Sustentável” ao ciclo global da construção, desde a aquisição das matérias-primas, incluindo o planeamento, projeto, construção, operação, demolição e gestão de resíduos (CIB & UNEP-IETC, 2002, citado por Gervásio, 2010). Assim, a avaliação da sustentabilidade dos edifícios implica o levantamento de todos os materiais e processos implicados na sua construção, desde a sua origem à sua desconstrução/reciclagem. Estes parâmetros traduzem-se em indicadores mensuráveis, aos quais é normalmente atribuído um valor relativo, que permite a obtenção de uma pontuação global que exprime o grau de sustentabilidade de um edifício, por comparação com um padrão definido no sistema de avaliação.

A standardização de um processo para Avaliação do Ciclo de Vida iniciou-se nos anos 60 e evoluiu até à publicação da norma ISO 14040 (Perez-Garcia e Lippke, 2005). No entanto, a Avaliação da Sustentabilidade de Edifícios ultrapassa o âmbito dos impactos relacionados com os materiais e processos envolvidos na construção. Inclui impactos de várias ordens, alguns de difícil quantificação, tais como o desempenho do edifício ao longo do seu período de utilização, ou outros de ordem social e económica, distribuídos por longos períodos de tempo. A alargada escala temporal deste tipo de análise aplicada a edifícios levanta alguns problemas, nomeadamente os relacionados com a incerteza relativamente à evolução das fontes e métodos de produção de energia, assim como a evolução dos processos de reciclagem.

De acordo com Mateus (2009), as dificuldades de aceitação generalizada de uma metodologia de avaliação da sustentabilidade, prendem-se com as seguintes limitações: a complexidade dos edifícios enquanto unidades funcionais a avaliar; a multidisciplinaridade inerente ao ciclo de vida; a elevada quantidade de materiais envolvidos no processo de construção; o baixo nível de industrialização que ainda se verifica no sector da construção; o longo período temporal implícito na fase de operação dos edifícios, cujo desempenho é condicionado por uma multiplicidade de factores frequentemente difíceis de estimar; e, ainda, as grandes assimetrias políticas, tecnológicas, culturais

e socioeconómicas existentes à escala global, que colocam o problema da adaptação da análise a cada contexto particular. Por essa razão, existem múltiplas metodologias disponíveis para avaliação da sustentabilidade, adaptadas aos diversos contextos nacionais e às diferentes funções desempenhadas pelos edifícios.

## **1.2 Enquadramento**

O tema a tratar na dissertação enquadra-se na problemática geral da sustentabilidade da construção. A madeira é um material com particularidades que o diferenciam de todos os outros, pelo que é necessário explorar quais as características que deverão ser avaliadas e potenciadas dentro do âmbito do desenvolvimento sustentável.

A sustentabilidade da construção é um tema que, por si só, se encontra na ordem do dia. No passado, a promoção da sustentabilidade centrava-se sobretudo em preocupações de eficiência energética. A regulamentação dos vários países ultrapassou essa questão, através da imposição e generalização de exigências de isolamento e instalação de sistemas de climatização que resolveram em grande parte o problema dos impactos ambientais da fase de utilização dos edifícios, pelo que o futuro da melhoria do perfil sustentável dos edifícios passa pela atenção aos materiais de construção e aos impactos que estes representam. A madeira é necessariamente um material a considerar neste contexto, pelo que lhe será dada especial atenção neste trabalho.

### **1.2.1 A Sustentabilidade da Construção**

É sobejamente conhecido o impacto que a indústria da construção tem no ambiente e na saúde da população, enquanto atividade que consome uma significativa fatia dos recursos naturais e da energia produzidos nos países desenvolvidos (Gervásio, 2010 e Mateus, 2009).

Os sistemas construtivos correntes em Portugal servem-se de uma significativa quantidade de cimento, quer para fins estruturais (produção de betão armado), quer como parte de enchimentos e acabamentos. A produção de cimento incorpora elevadas quantidades de energia, necessárias para o funcionamento dos altos-fornos. Essa energia provém de fontes altamente poluentes, normalmente combustíveis fósseis, pelo que o produto final incorpora uma significativa pegada ecológica. Além das emissões associadas ao processo de produção, os produtos de cimento não são correntemente conduzidos para reciclagem ou reutilização no final da vida útil do edifício, devido às dificuldades



inerentes à sua separação dos restantes materiais. Cerca de metade do aço presente em estruturas de betão armado a desmantelar é conduzido para reciclagem, sendo a quantidade restante de aço, os agregados e o cimento conduzidos para aterro.

Como é conhecido, existe uma diversidade de sistemas construtivos alternativos ao betão armado. Sob o ponto de vista da sustentabilidade, faz sentido estudar os sistemas “ligeiros”, que se servem de elementos leves e de secção relativamente reduzida, organizados segundo uma grelha de espaçamento reduzido. Estes sistemas envolvem menor massa total de matérias primas e, geralmente, reduzidas necessidades energéticas na fase de produção dos materiais e montagem em obra. Dois dos mais conhecidos sistemas estruturais “ligeiros” têm como materiais de base o aço enformado a frio e a madeira.

A construção em madeira, apesar de ser pouco frequente em Portugal, apresenta-se como uma alternativa a ponderar quando o objectivo é responder a uma dada necessidade funcional com preocupações de sustentabilidade. De facto, a transformação da matéria-prima em produtos finais para construção em madeira requer uma quantidade de energia relativamente reduzida. Nos casos em que se utiliza madeira maciça para fins estruturais, o processo de preparação consiste apenas no condicionamento da madeira, para obter o grau de humidade ideal para a construção e no corte em dimensões estandardizadas que permitem um uso mais prático em obra. Enquanto material higroscópico, a madeira contribui para a qualidade do ambiente interior e é ainda conhecida pela sua relativamente baixa condutividade térmica, pelo que se prevê que a sua utilização se reflita em vantagens ao nível da eficiência energética do edifício.

No que respeita às emissões de gases poluentes, sabe-se que as árvores armazenam dióxido de carbono nos seus tecidos, sendo este apenas libertado de novo para a atmosfera no momento da combustão ou decomposição da madeira, pelo que a construção com quantidades significativas deste material pode traduzir-se no eficiente armazenamento de dióxido de carbono durante o período de vida útil do edifício (Buchanan et al., 1999 e Lippke et al., 2010) A grande desvantagem que a madeira pode apresentar relativamente a outros materiais, reside na necessidade de manutenção periódica, em particular no que respeita aos elementos expostos às agressões ambientais. Relativamente ao peso da estrutura, é de esperar que seja inferior ao peso de uma estrutura em betão armado que cumpra os mesmos requisitos, e superior ao peso de uma estrutura de aço leve.

Apesar das elevadas quantidades de energia que poderão estar associadas aos materiais de construção utilizados num edifício e aos processos necessários à execução da obra, é de esperar que a fatia mais significativa de consumo energético esteja associada à fase de utilização, uma vez que

---

esta fase corresponde a um período alargado, com exigências de conforto que serão respeitadas diariamente. Por esta razão, torna-se relevante caracterizar a envolvente do edifício, e a forma como esta se relaciona com o clima onde o mesmo de implanta. Uma análise de ciclo de vida deve por isso considerar o desempenho energético do edifício, considerando que se mantém, no seu interior, um nível padrão de conforto para um dado período de vida útil. No entanto, à medida que os edifícios se tornam energeticamente mais eficientes – até atingirem o limite do *nearly zero emissions*, ou mesmo a capacidade de produzir energia e terem por isso balanço energético positivo – a importância relativa da fase de operação vai diminuindo, com conseqüente acréscimo da importância atribuída à energia incorporada na fase de construção (Rossi, 2012).

Em síntese, e de acordo com Rossi (2012), as práticas recomendadas para a redução do balanço energético em edifícios com preocupações de eficiência energética, passam por selecionar materiais com baixa energia incorporada; optar por estruturas eficientes e ligeiras, para minimizar o consumo de matéria-prima; utilizar materiais recicláveis e reutilizáveis, associados de modo a que possam ser separados no final da vida útil do edifício e, extremamente importante, projetar para a durabilidade desejada para cada edifício, prevendo as necessidades de manutenção. De facto, o número de anos que se prevê para a fase de utilização do edifício deverá ser um fator preponderante nas opções de projeto, selecionado os materiais em função das necessidades estabelecidas e da relação custo-benefício dos impactos de cada material, em relação à sua durabilidade.

### **1.2.2 O Papel da Madeira na Sustentabilidade da Construção**

A indústria florestal pode ter importância socioeconómica, ao mesmo tempo que contribui para a regulação climática, controla a erosão dos solos, contribui para um mais eficiente ciclo da água e para a biodiversidade da fauna e da flora (Perez-Garcia et al., 2005).



**Figura 1.1 - Exploração Florestal (fonte: <http://www.fcl-ltd.com/>)**

A madeira é um material natural, que se caracteriza pela heterogeneidade e anisotropia, o que pode constituir um obstáculo à sua utilização corrente na construção, em particular para fins estruturais. No entanto, é de considerar que a construção em madeira facilita os processos de pré-fabricação, tornando a construção in-situ rápida e flexível, em particular se as ligações utilizadas forem mecânicas e não químicas, tal como acontece na maioria dos sistemas construtivos tradicionais. Os edifícios antigos constituem, com frequência, exemplos de boas práticas de utilização da madeira em construção, quer pela sua durabilidade, quer pela adaptabilidade que demonstram ao longo do tempo.

Mateus e Bragança (2006) apresentam uma lista consolidada de aspectos a ter em conta com vista a uma construção mais sustentável. A madeira insere-se com naturalidade na maioria dessas diretrizes, nomeadamente:

i) Economia de energia e água: estão disponíveis diversos processos construtivos de baixa tecnologia e baixa energia incorporada, que se servem da madeira como material de construção. O processo de transformação da madeira desde o seu estado bruto (na árvore) até à sua comercialização como material de construção, pode consistir apenas no seu corte em dimensões estandardizadas e condicionamento ao grau de humidade adequado para a construção;

ii) Salubridade dos edifícios: como material higroscópico, e verificando-se o cuidado na seleção de processos de conservação, proteção e acabamento da madeira, esta concorre para a manutenção da qualidade do ar interior;

iii) Durabilidade dos edifícios: existem diversos exemplos de edifícios antigos construídos com base neste material, que se mantêm em boas condições de conservação sem recurso a tratamentos preservadores. O correto projeto de arquitetura, promovendo a ventilação natural e afastando os

elementos de madeira das fontes de humidade, assegura a significativa durabilidade dos elementos de madeira. A utilização de elementos independentes, interligados através de processos mecânicos (como, por exemplo, parafusos) permite a substituição de elementos isolados sempre que necessário, o que prolonga o período de vida útil do edifício no seu todo. Sempre que possível, deverão ser previstas em fase de projeto todas as operações de conservação e manutenção necessárias ao prolongamento da vida útil da construção;

iv) Relativamente à ecoeficiência dos materiais a utilizar na construção, a madeira corresponde de forma particularmente afirmativa à baixa incorporação de energia primária e à eventual disponibilidade nas proximidades do local de construção (o que poderá ser garantido através de uma política de exploração florestal distribuída por todo o território, que ainda não se verifica em Portugal). Quando não são utilizados processos químicos agressivos de proteção e conservação da madeira, esta apresenta um elevado potencial de reciclagem. No caso de derivados de madeira, normalmente estes integram já uma elevada percentagem de material reciclado no seu fabrico, o que não impede a nova reciclagem ou a sua combustão para produção de energia, no final da sua vida útil;

v) A baixa massa de construção é uma característica apontada com frequência neste este tipo de construção. Perez-Garcia et al. (2005) refere uma redução de 75% na massa de construção para o mesmo edifício, num caso de estudo em que se analisou a substituição de uma estrutura em betão armado por uma em madeira;

vi) No que respeita à minimização da produção de resíduos, a madeira é um material muito eficiente. Além da corrente e vastamente implementada rede de valorização de resíduos de madeira (que são encaminhados para produção de derivados deste material), o senso comum indica-nos que os desperdícios deste material são valorizados inclusive em ambiente doméstico, em combustão direta para produção de energia térmica. O serrim é ainda utilizado frequentemente na criação de animais e agricultura.

### **1.2.2.1 Dimensão ambiental**

Tal como referido no ponto anterior, pode considerar-se que praticamente não existem desperdícios resultantes da transformação da madeira, uma vez que todos os resíduos são coprodutos que podem ser reutilizados na produção de derivados de madeira ou de biocombustível.

O uso da madeira pode ser determinante para alcançar o objectivo “carbono zero”, dado que as árvores, ao longo do seu processo de crescimento, armazenam dióxido de carbono nos seus tecidos, através do processo de fotossíntese (ver Figura 1.2). Este, só é novamente libertado quando a madeira sofre um processo de combustão ou decomposição, pelo que durante todo o período de vida útil dos edifícios em madeira, o dióxido de carbono que a integra fica imobilizado (Buchanan e Levine, 1999). É, assim, possível armazenar quantidades significativas de CO<sub>2</sub> por períodos de tempo que variam de acordo com o período de vida útil dos materiais produzidos. De acordo com Karjaleinen et al (1994), esta propriedade da madeira pode ser potenciada quando a mesma é utilizada como matéria prima para produtos altamente duráveis (como a maioria dos materiais de construção), em detrimento de produtos com uma vida útil de curta duração (por exemplo, o papel). No fim de vida dos produtos de madeira, de forma a evitar a libertação imediata do dióxido de carbono neles contido para a atmosfera, o que ocorre aquando da combustão do material para produção de energia, é desejável que os produtos sejam depositados em aterro. A decomposição da madeira ocorre de forma lenta, pelo que a deposição em aterro mantém o sequestro do CO<sub>2</sub> nela contido, por um período de tempo significativamente mais alargado, quando comparado com o processo de combustão.

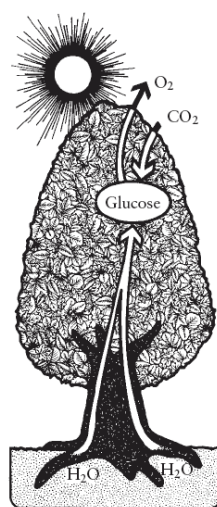


Figura 1.2 - Processo de fotossíntese (fonte: Schmulsky & Jones, 2011)

Além das propriedades já referidas, é ainda de notar que a madeira tem baixo índice de condutividade térmica, pelo que, ao mesmo tempo que cumpre a sua função estrutural ou de acabamento, pode contribuir ativamente para a eficiência energética dos edifícios, em particular quando comparada com materiais de elevada condutividade térmica, como por exemplo o aço, tal como se pode observar na simulação de comportamento térmico representada na Figura 1.3.

---

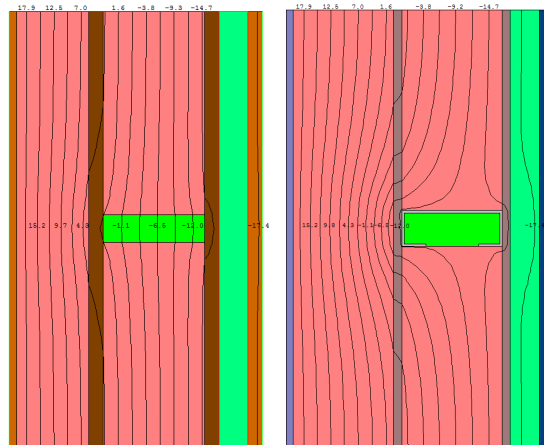


Figura 1.3 - Modelação térmica, no software THERM, de duas paredes exteriores de composição idêntica, excepto a estrutura: madeira (esquerda) e aço leve (direita) (Fonte: Coelho e Lopes, 2012)

### 1.2.2.2 Dimensão Social

Os impactos sociais são parte integrante da Avaliação da Sustentabilidade. No entanto, a grande maioria dos estudos publicados até à data tem negligenciado esta vertente, por ser de difícil quantificação e de análise frequentemente subjetiva. No entanto, publicações recentes, como Cuerda (2012) e Sanz-Calcedo (2012) destacam a importância da consideração dos fatores humanos para uma análise mais abrangente da Sustentabilidade do ambiente construído. Este novo interesse é, entre outras razões, motivado pelo já extenso e, em alguns casos, exaustivo estudo dedicado às vertentes económica e ambiental, que tem monopolizado grande parte das atenções nos últimos anos. Surge agora a necessidade de estudar e quantificar com mais detalhe aspectos relacionados com o impacto da construção e dos sistemas construtivos no grau de satisfação e de segurança dos vários intervenientes ao longo do ciclo de vida do edifício: desde os indivíduos envolvidos na produção dos materiais de construção, passando pelos trabalhadores da indústria da construção, e terminando nos utilizadores dos edifícios e na comunidade servida por esses mesmos edifícios. Os impactos, quer positivos quer negativos, são de múltipla ordem e carecem de estudo aprofundado, especialmente no que respeita aos métodos e ferramentas utilizados para a sua “quantificação” e incorporação nas metodologias de avaliação da sustentabilidade.

Relativamente ao uso da madeira, algumas oportunidades de aprofundamento de aspectos relacionados com a avaliação de impactos sociais foram detectadas, nomeadamente:

i) A importância das indústrias florestais para a economia local: em zonas rurais ou pouco industrializadas, a exploração florestal sustentada poderá ser uma atividade que ajude a promover o desenvolvimento económico e a consequente criação de condições para a fixação da população. Esta oportunidade é particularmente interessante para populações relativamente jovens e disponíveis para adoptar métodos de exploração sustentáveis, que respeitem os ciclos de crescimento das árvores e introduzam práticas e conhecimentos característicos de uma florestação eficiente e responsável;

ii) Disponibilidade do material e economia na sua preparação para construção, em países subdesenvolvidos: o processo de transformação da madeira, desde o abate da árvore até esta ficar apta para uso como material estrutural ou de revestimento, pode ser simples, requerendo reduzidas quantidades de energia, se forem utilizados alguns dos métodos *low tech* que estão disponíveis, alguns deles constituindo inclusive parte dos conhecimentos ancestrais de certas comunidades. Em países subdesenvolvidos, como por exemplo alguns países africanos, existe madeira em quantidade e qualidade ajustadas ao seu uso em construção. O uso da madeira pode revelar-se uma opção mais racional e económica para estas comunidades, valorizando a produção local e ajudando a evitar a “importação” de materiais e técnicas de outros países, com os custos e desequilíbrio da balança comercial subjacentes;



Figura 1.4 - Madeira para exportação ilegal, apreendida num porto da Tanzânia (fonte: [www.cept.net](http://www.cept.net))

iii) Possibilidade de autoconstrução, recorrendo a ligações mecânicas e/ou técnicas tradicionais: as particularidades da madeira, quando explorado o seu potencial de construção modular com recurso a ligações mecânicas ou técnicas tradicionais, podem em muitos casos permitir a autoconstrução. Esta possibilidade é particularmente relevante nos casos em que o utilizador disponha de tempo e conhecimentos que lhe permitam construir a sua própria casa, mais do que disponibilidade económica para contratar o serviço a terceiros. Em casos já estudados (Sanz-Calcedo, 2012), a autoconstrução reflete-se numa estreita ligação entre o indivíduo e o edifício, o

---

que representa um elevado grau de realização pessoal. Uma das “unidades de construção” que se adapta com facilidade aos processos de autoconstrução é a alvenaria (ver Figura 1.5);



**Figura 1.5 - Alvenaria estrutural em madeira (Silva et al., 2011)**

iv) A madeira é um material utilizado desde a antiguidade, sendo provavelmente o material de construção mais antigo que conhecemos, juntamente com a pedra. Os vários milénios de desenvolvimento e aperfeiçoamento de técnicas construtivas não devem ser desvalorizados. Antes pelo contrário, deve ser explorado o potencial de recuperação e valorização de técnicas vernaculares. Os edifícios antigos apresentam soluções simples e eficazes para aumento da durabilidade dos elementos de madeira, com recurso a pormenores construtivos que favorecem a ventilação e minimizam o contacto da madeira com as águas pluviais ou provenientes do terreno, entre outras “boas práticas” que resolvem a maioria dos problemas associados à construção em madeira, sem recuso a tratamento químico ou técnicas dispendiosas. No que respeita aos conhecimentos ancestrais sobre construção, é de notar que as técnicas existentes se encontram estreitamente ligadas aos locais onde foram desenvolvidas e aperfeiçoadas ao longo dos anos. Por essa razão, estão totalmente adaptadas às necessidades impostas pelo clima local e à disponibilidade de espécies autóctones nas proximidades do local de construção. Além da mais-valia que a recolha de conhecimentos ancestrais pode significar para o desenvolvimento de novos métodos construtivos, também de uma perspectiva cultural é importante recuperar e difundir este tipo de conhecimento (Fernandes & Mateus, 2012).

v) Escala humana na construção: as técnicas construtivas inspiradas nos sistemas tradicionais, servem-se geralmente de “unidades” de material construtivo passíveis de transporte e montagem por indivíduos, sem a ajuda de maquinaria pesada ou sofisticada. É o caso das abóbadas tradicionais de tijolo utilizadas em Espanha, referidas por Sanz-Calcedo (2012). O mesmo princípio poderá ser aplicado à madeira, quando utilizada em módulos de dimensões adequadas à escala humana. Estes métodos geralmente carecem de mão-de-obra especializada e em número superior à utilizada nos

---



métodos que dependem de elementos construtivos mais pesados e maquinaria específica, como por exemplo a construção em betão. Em países com elevadas taxas de desemprego – como é o caso de Espanha, tal como referido por Sanz-Calcedo (2012), e mesmo de Portugal – existe uma clara vantagem em promover o uso de técnicas com capacidade para empregar um elevado número de pessoas, ao mesmo tempo que dotam esses indivíduos de conhecimentos e experiência que os valorizam profissionalmente. Por um lado, esta abordagem diminui a dependência de fontes de energia fósseis, geralmente associadas à dependência externa da economia dos países europeus; por outro, o facto de se tratar de técnicas que carecem de mão-de-obra especializada, contribui para a formação e conseqüente maior satisfação pessoal dos operários com o seu trabalho. De acordo com Cuerda (2012), a exigência de atenção e a satisfação dos trabalhadores quando são colocados perante tarefas de “escala humana” têm como última conseqüência a diminuição dos acidentes de trabalho, que têm como uma das causas mais evidentes a monotonia e excessiva simplicidade das operações. Como material de uso tradicional, e mesmo considerando novas técnicas de construção “leve”, o uso da madeira adapta-se perfeitamente a esta filosofia de construção apoiada sobretudo nas competências do trabalhador (Figura 1.6);



**Figura 1.6 - Casa de Madeira no Japão, Arquitecto Sou Fujimoto (fonte: [www.archdaily.com](http://www.archdaily.com))**

vi) Satisfação subjetiva dos utilizadores pelo contacto com um material natural, quando utilizado em revestimentos: a madeira é um material natural, com padrão e textura irregulares e baixo índice de condutividade térmica. Embora de forma subjetiva e difícil de quantificar, muitas pessoas consideram-na um material “quente”, propiciador de conforto quando disponível à vista e ao toque (ver Figura 1.7);



**Figura 1.7 - Casa em Madeira em Espanha (fonte: [www.disdigs.com](http://www.disdigs.com))**

vi) O baixo peso e a modularidade facilitam a adaptação da construção ao “novo nomadismo” característico da atualidade: nos dias de hoje, é conhecida a dificuldade das famílias e indivíduos em “fixarem-se” por um longo período de tempo, como era característico de há uma ou duas décadas atrás. Pelo contrário, as exigências pessoais e profissionais levam a que as pessoas mudem de cidade ou mesmo de país várias vezes ao longo da vida. A construção convencional caracteriza-se pela fixação permanente do edifício ao local de implantação. No entanto, os novos métodos construtivos de “baixo peso”, proporcionados por materiais estruturais leves tal como a madeira ou o aço enformado a frio, permitem uma nova visão sobre a implantação do edifício. A construção em fábrica de módulos completos que podem ser transportados por via terrestre ou marítima, abre a possibilidade de mudança de localização do edifício ao longo da sua vida útil. Numa perspectiva de sustentabilidade, a possibilidade de agregação de módulos ao longo da vida de um edifício pode ser decisiva para evitar a sua obsolescência, uma vez que permite a adaptação a novas circunstâncias que exijam o aumento ou redução da área útil disponível. Dois exemplos de módulos habitacionais passíveis de transporte após a sua montagem integral estão representados nas Figuras 1.8 e 1.9.



Figura 1.8 - Transporte de uma casa pré-fabricada com as dimensões de um contentor (fonte: [www.modular-system.com](http://www.modular-system.com))



Figura 1.9 - "Torre Turística Transportável (TTT), do Arq. José Pequeno, em transporte de Portugal para a China (fonte: [www.tttower.com](http://www.tttower.com))

### 1.3 Motivos e Objectivos da dissertação

A presente dissertação tem como principal objetivo a exploração do papel que a madeira poderá desempenhar, enquanto material de construção, na perseguição do grande objectivo do aumento da sustentabilidade a nível global.

Para tal, é necessário contextualizar as suas propriedades, características e limitações, dentro da problemática geral da sustentabilidade e, em particular, das metodologias que a avaliam e que garantem, particularmente em fase de projeto – o momento ideal para otimizar as características da construção a realizar – que os grandes objetivos na redução dos impactos, sejam eles ambientais, económicos ou sociais, são cumpridos.

Efectuada a contextualização dentro da literatura existente sobre o tema, é objectivo aplicar a metodologia de avaliação de ciclo de vida a diferentes casos de estudo, com vista à aferição das possibilidades e limitações não só da própria metodologia, mas também explorar as eventuais vantagens e desvantagens da utilização deste material sob uma perspectiva, em particular, de impacto ambiental.

---

Dado que a proposta de uma metodologia de avaliação específica, adaptada às particularidades dos edifícios de madeira, ultrapassa o âmbito e as limitações temporais impostas para o presente trabalho de pesquisa, o objectivo final da dissertação será a identificação de eventuais problemas, questões ou barreiras levantados pela aplicação da metodologia existente a este tipo de edifícios. A identificação desses aspectos poderá constituir uma base de trabalho para, num eventual trabalho de âmbito mais alargado, a elaboração de uma metodologia própria.

#### **1.4 Organização da Dissertação**

A dissertação inicia-se por uma breve descrição das motivações e objectivos que levaram ao empreendimento do presente trabalho de pesquisa e experimentação. Esta parte introdutória corresponde ao início do primeiro (e presente) capítulo. Para um correto entendimento da pertinência do tema geral da sustentabilidade, aqui aplicado ao caso concreto do uso da madeira como material de construção, a segunda parte deste primeiro capítulo é dedicada ao enquadramento na problemática da sustentabilidade do sector da construção. Dada a vasta bibliografia publicada e disponível sobre a sustentabilidade da construção, nesta dissertação dar-se-á especial destaque ao papel que a madeira poderá desempenhar para o cumprimento dos objectivos gerais da sustentabilidade, remetendo as considerações gerais e definições mais abrangentes para a bibliografia consultada. Complementarmente, apresenta-se um sucinto estado da arte sobre as atuais linhas de orientação (ou sentido de evolução) para a sustentabilidade da construção, com natural foco nos processos favoráveis à utilização de produtos de madeira, como por exemplo a pré-fabricação, a reciclagem e a reutilização.

Um conjunto de medidas concretas para o incremento da Sustentabilidade da Construção são enunciadas no capítulo 2. O conjunto de linhas de orientação apresentado centra-se no processo de seleção de materiais de construção, na possibilidade de pré-fabricação e nos processos de valorização de resíduos no fim-de-vida da construção. É descrito de que forma estes processos podem contribuir para o objectivo final da sustentabilidade.

O Capítulo 3 é dedicado ao levantamento de metodologias disponíveis para avaliação da sustentabilidade e dos impactos ambientais ao longo da vida do edifício. Especial atenção é dedicada ao processo de Avaliação de Ciclo de Vida (ACV) que, sendo menos “holístico” do que as ferramentas que consideram aspectos de ordem qualitativa na avaliação, coaduna-se particularmente com o objectivo de quantificação objectiva dos impactos ambientais associados à construção em

---

madeira, sendo a ferramenta indicada para estabelecer comparações entre diferentes sistemas construtivos para um mesmo edifício. Este capítulo dedica-se predominantemente à descrição de metodologias de ordem “teórica”, mecanismos criados para avaliar o desempenho de soluções concretas.

Com vista à determinação objectiva das limitações e dificuldades da aplicação de métodos de Avaliação de Ciclo de Vida a edifícios de madeira, dois casos de estudo foram analisados. Ambos assumem como unidade funcional uma habitação unifamiliar em madeira, construída para alojar uma família de 4 pessoas durante um período de 50 anos. Apesar de o sistema construtivo adoptado ser semelhante em ambos os casos, a configuração e materiais adoptados são diferentes, assim como os objectivos de cada um dos casos de estudo. Em suma, os dois casos de estudo não foram definidos com o objectivo de serem comparáveis entre si, mas apenas de levantarem diferentes questões, relacionadas com as diferentes abordagens possíveis. De acordo com Mateus (2009), os dois principais objectivos da prossecução de uma ACV são a aferição da contribuição das várias fases do ciclo de vida de um produto para os seus impactos globais, e a comparação entre diferentes produtos para uma mesma função. Cada um dos casos de estudo pretende responder a um destes dois objectivos.

No primeiro caso analisado, que se apresenta no Capítulo 4, estabelece-se uma comparação entre dois sistemas estruturais - aço enformado a frio e madeira - para uma mesma habitação. Para isso, efetuam-se duas ACV para o mesmo edifício, em que apenas se varia o parâmetro que se pretende analisar: a estrutura. Simulando a possível abordagem de um decisor em fase de projeto, e considerando que a maioria das equipas de projeto não integra um especialista em ACV nem programas específicos para este fim, utilizou-se um método de fácil utilização e compreensão, que se serve de uma base de dados de utilização livre e disponível online: o *BEES* (Lippiat, 2007).

No segundo caso de estudo (Capítulo 5), o objectivo é estudar com detalhe as várias fases e materiais envolvidos no ciclo-de-vida de uma habitação com estrutura e revestimento exterior em madeira. Neste caso, efetua-se uma ACV detalhada de apenas um edifício, com recurso a software específico para este fim, o *GaBi 4* (PE International, 2007). Para aferição de quais os parâmetros cuja variação produz maiores efeitos na globalidade dos impactos do ciclo de vida do edifício, foi efectuada uma análise de sensibilidade em que diferentes cenários de fim-de-vida e de necessidades de transporte foram testados.

O Capítulo 6 apresenta uma reflexão crítica que pretende sintetizar as oportunidades e dificuldades detectadas nos capítulos anteriores, quer no que respeita ao estado da arte, quer à aplicação da ferramenta ACV a casos concretos. Esta parte do trabalho tem como objectivo a

---

proposta de linhas de orientação para a definição de uma metodologia para a avaliação da sustentabilidade de edifícios de madeira.

No final, apresenta-se uma reflexão final sobre o conjunto do trabalho efectuado, complementada por um conjunto de indicações para futuros desenvolvimentos.

## **2. LINHAS DE ORIENTAÇÃO PARA A SUSTENTABILIDADE DA CONSTRUÇÃO**

Como contextualização prévia ao levantamento de metodologias de avaliação da sustentabilidade, importa sistematizar algumas linhas de orientação e oportunidades de desenvolvimento com vista à optimização da prática construtiva, na perseguição do objectivo final da sustentabilidade.

Perez-Garcia (2005) aponta as seguintes oportunidades de evolução para a indústria da construção, com vista à redução dos impactos ambientais: a) aumentar a durabilidade das soluções; b) aumentar a possibilidade de reciclagem dos resíduos de demolição; c) reduzir a inclusão de produtos com elevada incorporação de combustíveis fósseis; d) redução das quantidades de materiais utilizados, com vista a uma construção mais ligeira.

Em particular no que respeita à madeira, recomenda a utilização de fibras de madeira de espécies pouco valorizadas para produção de derivados de elevado valor - esta prática leva à obtenção de mais produtos, virtualmente sem aumentar os impactos associados à exploração florestal, uma vez que permite o aproveitamento de todas as espécies disponíveis, mesmo as tradicionalmente menos valorizadas.

### **2.1 Materiais de construção**

De acordo com o observado na análise dos resultados da aplicação de metodologias de ACV ao conjunto da vida útil de vários edifícios, é um padrão comum entre muitos autores a conclusão de que o aumento da eficiência energética dos edifícios, com redução dos consumos de energia virtualmente até “zero”, recentra a atenção sobre os materiais de construção, em particular sobre os impactos dos consumos de energia associados à sua produção (Rossi, 2012).

Joseph (2010) apresenta uma interessante e completa revisão bibliográfica sobre a sustentabilidade dos materiais de construção. O objectivo da sua investigação é efetuar um levantamento crítico e extensivo dos materiais de construção não-metálicos disponíveis, de forma a propor novos desenvolvimentos nesta área. Relativamente à madeira, o autor afirma que esta é uma das possíveis boas escolhas para material de construção, em particular se forem cumpridos determinados requisitos, nomeadamente: ser explorada localmente, utilizada sem tratamento e “desenhada” para um alargado período de vida útil. Para prossecução destes objectivos, sugere o emprego de técnicas e tradições vernaculares, que normalmente se servem dos materiais disponíveis localmente e cujo uso é aceite pela legislação local. Assume que acontecimentos recentes como a

---

desflorestação, a destruição dos habitats naturais, chuvas ácidas, elevada taxa de consumo de madeira e uso extensivo de produtos de conservação tóxicos levaram a que a madeira seja, por alguns, vista como um material não-sustentável. Além disso, alguns consumidores (baseia-se numa amostra da população alemã) ainda pensam a madeira como um material altamente combustível, de baixa durabilidade e com significativas exigências de manutenção (Joseph, 2010). Quando não são observadas as boas práticas da indústria florestal, pode ocorrer a poluição da água por uso excessivo de fertilizantes e pesticidas, a eliminação de significativas áreas de floresta e a perda da biodiversidade. No entanto, se for efectuada uma gestão sustentável das florestas, a madeira tem elevado potencial de sustentabilidade, uma vez que as árvores necessitam apenas de energia solar para o seu crescimento, o processamento da madeira consome reduzida quantidade de combustíveis fósseis e, de uma forma geral, o conjunto do ciclo-de-vida da madeira representa menor emissão de gases com efeito de estufa, quando comparado com o ciclo de vida de outros materiais usados para os mesmos fins. Aponta ainda que as florestas com elevada rotatividade são mais eficientes no armazenamento de CO<sub>2</sub>, uma vez que a partir de um certo número de anos - cerca de 100 - as árvores estabilizam a sua dimensão, o que se traduz numa reduzida absorção de dióxido de carbono nos anos subsequentes. Daqui resulta que o uso intensivo de produtos de madeira com elevada durabilidade possa representar benefícios ambientais a curto e médio prazo, uma vez que a árvore já “estabilizada” pode ser transformada em produtos com durabilidade de várias dezenas de anos, dando lugar na floresta ao crescimento de árvores mais jovens, com taxas de absorção de CO<sub>2</sub> mais elevadas. O autor recomenda a investigação sobre o uso de outros materiais de origem biológica na construção, tais como bambu, fardos de palha, fibras vegetais, resíduos da agricultura e óleos de sementes. Em suma, as linhas de orientação propostas por Joseph (2010) são: uso de energias renováveis em todas as fases do processo; uso de materiais provenientes de fontes renováveis; ênfase nos produtos disponíveis localmente e acessíveis a comunidades pobres; reabilitação e aplicação de técnicas vernaculares; aumento do uso de materiais reciclados e do potencial de reutilização dos materiais, e aumento da durabilidade da construção e do seu nível de desempenho, diminuindo a necessidade de manutenção e reparação.



## 2.2 Pré-Fabricação, Reciclagem e Reutilização

Um dos aspectos que parece assumir elevada importância na avaliação de ciclo de vida dos edifícios, é o seu potencial de reciclagem, que é favorecido quando são utilizados métodos de construção com recurso a elementos pré-fabricados.

De facto, não é ainda comum pensar-se um edifício como um “produto” que se possa integrar nos mecanismos de valorização de resíduos. Sobre este assunto, Thormark (2001) tenta responder à pergunta de investigação “Quais os benefícios ambientais da reciclagem dos resíduos de construção?”. De forma a dar-lhe resposta, propõe-se a estudar, mais precisamente: i) os efeitos ambientais da reciclagem dos resíduos de construção e demolição na Suécia; ii) comparar três cenários de fim-de-vida: o cenário base, assumido em 1996, e duas alternativas atuais que define; iii) analisar as limitações ao aumento da reciclagem e iv) identificar as possibilidades e as áreas que carecem de maior investigação dentro desta problemática. A metodologia utilizada com vista à prossecução destes objectivos, apoia-se em duas ferramentas distintas: por um lado, o autor utiliza as bases de dados existentes, às quais acede através de pesquisa bibliográfica, e efetua cálculos com vista a obter resultados precisos. Por outro lado, reconhece que esta área foi pouco explorada, pelo que se propõe a realizar algum trabalho de campo para colmatar informação sobre os cenários de fim-de-vida dos materiais, nomeadamente processos de desmantelamento e separação de resíduos da construção. Para estimar quais as práticas comuns na Suécia, realiza entrevistas a vários responsáveis pela demolição de edifícios e pela gestão de resíduos, de forma a definir cenários realistas.

Deste modo, Thormark (2001) conclui que o aumento da reciclagem de resíduos de construção pode provocar um decréscimo significativo no consumo de energia na Suécia: a reutilização de alguns produtos elimina a necessidade de produzir novos materiais, sem qualquer dispêndio adicional de energia; a reciclagem normalmente comporta consumos de energia muito inferiores aos do fabrico a partir de matérias-primas; os materiais que não podem ser reciclados, nos casos em que a sua combustão não é nociva para o ambiente, podem constituir uma fonte de energia alternativa aos combustíveis fósseis. A autora termina sublinhando a importância da consideração do fim-de-vida logo em fase de projeto, nomeadamente através do uso de materiais que possam ser separados e aproveitados no final da vida-útil do edifício. Deixa mesmo um repto à investigação sobre *optimum size modules*, ou seja, encontrar a medida certa para a dimensão dos materiais de construção modulares: nem tão pequenos como os tijolos, que são difíceis de separar, nem tão

grandes que não possam ser retirados do edifício sem que isso implique a sua destruição enquanto unidades de construção.

No que respeita à consideração do potencial de reciclagem de um edifício na sua Análise de Ciclo de Vida (ACV), é de notar a publicação sueca de 2006, da mesma autora, Thormark (2006), que investiga um dos edifícios com maior eficiência energética no país, à data da realização do estudo. A autora coloca o foco da análise nos efeitos que a variação dos materiais de construção provoca na quantidade de energia incorporada na construção do edifício e no potencial de reciclagem do mesmo. Outro objectivo que define para o seu estudo é a obtenção de um valor de referência para o consumo de energia ao longo da vida útil do edifício, para um edifício de elevada eficiência num clima frio. O método que utiliza tem por base uma extensa revisão bibliográfica sobre o tema, de modo planear a análise de um caso de estudo, para posterior generalização dos resultados obtidos. Os dados são processados através de sistemas de cálculo adaptados aos parâmetros que a autora pretende estudar, nomeadamente um método de simulação dinâmica para cálculo da energia de aquecimento, e recolha bibliográfica de valores de referência para os impactos dos materiais de construção. Após uma análise de sensibilidade em que a autora varia entre três combinações possíveis de materiais, assumindo o mesmo nível de desempenho energético entre os três edifícios (através da adaptação das espessuras de isolamento a cada caso concreto), conclui que o aspecto mais importante a trabalhar com vista a reduzir o balanço de energia dos edifícios é a escolha dos materiais usados na construção, não só devido à energia incorporada na sua produção, mas também no que concerne ao potencial de separação de materiais, e posterior reciclagem. Para obter os resultados desejados a este nível, sublinha a importância de “desenhar para a desmontagem”, através de um cuidado especial com os métodos de ligação entre os vários materiais. Adianta ainda a discutível conclusão de que os ganhos energéticos conseguidos com a reutilização dos materiais é apenas ligeiramente superior aos ganhos obtidos com a reciclagem e encaminhamento dos resíduos para produção de combustíveis.

Uma publicação muito recente, Aye et al (2012) propõe-se a quantificar as emissões de gases com efeito de estufa em módulos de construção pré-fabricados e reutilizáveis. O autor faz uma análise consistente da bibliografia publicada sobre este tema, onde destaca os seguintes valores ilustrativos: a pré-fabricação pode reduzir os resíduos da construção até 52%, além de que reduz a energia necessária e os custos associados ao processo, ao mesmo tempo que reduz os tempos de construção. O estudo apoia-se na falta de estudos detalhados até à data sobre os benefícios ambientais da pré-fabricação, para propor uma abordagem que pretende ser mais completa e abrangente do que toda a investigação anterior sobre este assunto. Desta forma, Aye et al. (2012)

---

parte de um caso de estudo, ao qual aplica três diferentes sistemas construtivos: o primeiro, em aço modular pré-fabricado; o segundo, em madeira modular pré-fabricada, e o terceiro, uma estrutura convencional em betão. Para a avaliação, utiliza um sistema híbrido, baseado no sistema input-output (Lenzen, 2002, citado por Aye et al, 2012). Os resultados relativos à energia incorporada na construção favorecem a solução em betão (9,64 GJ/m<sup>2</sup>), embora com um valor muito próximo da solução pré-fabricada em madeira (10,49 GJ/m<sup>2</sup>), mas apresentando uma vantagem assinalável relativamente à solução em aço (14,40 GJ/m<sup>2</sup>). A energia necessária à fase de utilização do edifício segue a mesma ordenação, embora com diferenças menos relevantes, tal como se pode observar no gráfico seguinte.

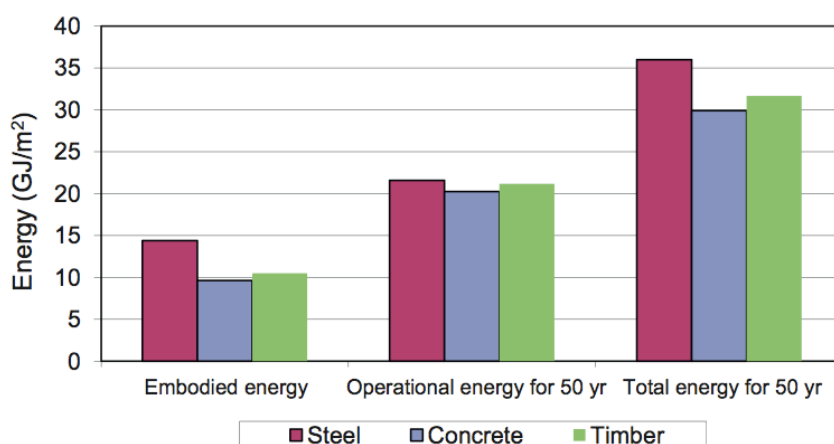


Gráfico 1 - Balanço energético das três alternativas estudadas, respectivamente: pré-fabricado em aço, betão e pré-fabricado em madeira (Aye et al, 2012).

O autor apresenta resultados detalhados para as duas primeiras fases da vida do edifício (construção e operação), mas trata de forma sumária a fase de fim-de-vida, que se esperava que fosse o ponto mais relevante neste estudo, uma vez que o objectivo é “quantificar” a vantagem do uso de elementos pré-fabricados. Os resultados para esta fase expressam-se apenas em massa e respectiva percentagem de materiais que podem ser conduzidos para reutilização (excluindo o autor o cenário de reciclagem), não traduzindo esta reutilização em economia de emissões de gases com efeito de estufa ou energia. A apresentação desses valores (neste caso, provavelmente negativos, uma vez que a reutilização significa evitar a produção de novos materiais) seria interessante para concluir o balanço do ciclo de vida das três variações para o mesmo edifício, e assim apresentar conclusões que quantificassem objectivamente as diferenças de desempenho entre as opções apresentadas, pela soma das três fases consideradas: construção, utilização e desmantelamento. No entanto, ainda que sem quantificar, Aye et al. (2010) deixa considerações finais de ordem

qualitativa, onde afirma que o seu estudo indica claramente que a construção pré-fabricada (ver, por exemplo, a Figura 2.1), nos casos em que o edifício é projetado para a reutilização, adaptação e desmontagem, apresenta melhor desempenho ambiental do que outros métodos de construção convencionais.



**Figura 2.1 - Paineis Pré-fabricados em CLT (Cross-laminated Timber), fonte: [www.storaenso.com](http://www.storaenso.com)**

Tam & Tam (2006) refere-se ao potencial de reciclagem de vários resíduos de construção e demolição, identificando as várias alternativas disponíveis no que concerne à madeira:

- i) reutilização direta, após limpeza, remoção das fixações metálicas e ajuste às dimensões pretendidas;
- ii) transformação da madeira em elementos de pequenas dimensões para utilização como agregado na produção de betão leve;
- iii) reciclagem da madeira para produção de energia;
- iv) utilização como matéria-prima para produção de derivados de madeira, nomeadamente painéis de cobertura, paramentos e pavimentos, embalagens, painéis de condicionamento acústico, entre outros;
- v) utilização como matéria-prima para produção de papel e cartão.
- vi) utilização de partículas de madeira na agricultura, para melhorar a qualidade dos solos à superfície;
- vii) utilização de lâminas de madeira para melhorar o potencial de utilização de solos inclinados, num processo chamado “geofibra”, comum no Japão;
- viii) as partículas de madeira podem ainda ser utilizadas na produção de materiais de revestimento para pavimentos, materiais de isolamento, utensílios de cozinha ou mobiliário.

Uma outra publicação que se refere à reciclagem de produtos de madeira é Nassén et al. (2012). Este trabalho refere que as taxas de reciclagem dos vários produtos de construção diferem significativamente na literatura disponível. No entanto, no estudo que efetua, o autor assume uma taxa de reciclagem de 80% para a madeira na construção. O seu estudo acaba por concluir que a variação da taxa de reciclagem não é muito relevante no resultado final, uma vez que o processo de reciclagem se prevê acontecer “100 anos no futuro”, em que, segundo a sua previsão e o cenário que assume na ACV, as emissões de dióxido de carbono provenientes dos sistemas de produção de energia serão muito baixas.

### **2.3 Síntese do capítulo**

Em suma, da recolha de informação efectuada resultam duas ideias fundamentais a ter em consideração nos futuros desenvolvimentos da sustentabilidade do sector da construção .

Em primeiro lugar, a renovada importância da seleção dos materiais de construção segundo o seu perfil sustentável, logo em fase de projeto, tendo em consideração que as medidas de eficiência energética já implementadas retiraram a tradicional importância associada aos impactos da fase de utilização dos edifícios.

Em segundo lugar, ressalta a ideia de que os processos de pré-fabricação são favoráveis aos objectivos da Sustentabilidade, uma vez que permitem reduzir os resíduos de construção e favorecem a separação de materiais no fim-de-vida do edifício, permitindo a reutilização ou reciclagem. Um outro processo possível é a “desmontagem seletiva”, que não é mais do que a possibilidade de substituir alguns elementos por razões funcionais ou de conservação, sem comprometer a totalidade do edifício.

Em particular no que respeita à madeira, são evidentes as múltiplas possibilidades que este material apresenta, no que respeita ao potencial de reciclagem, reutilização e pré-fabricação.



### 3. METODOLOGIAS PARA AVALIAÇÃO DA SUSTENTABILIDADE

O desenvolvimento sustentável assenta em três vertentes: a dimensão ambiental, a económica e a social. A dimensão ambiental refere-se à utilização de recursos naturais e emissão de poluentes, estando portanto relacionada com factores ecológicos e de relação com os ecossistemas. A dimensão económica é a de mais fácil percepção e aquela que tradicionalmente é mais valorizada pelos decisores, e relaciona-se com os custos envolvidos num processo. A dimensão social é uma preocupação mais recente e tem como centro da sua preocupação a aferição dos impactos (positivos e negativos) que um dado processo tem numa comunidade, tais como a melhoria do nível de vida, a geração de emprego ou outros de nível por vezes subjetivo. No encontro mundial sobre desenvolvimento sustentável que teve lugar em Joanesburgo, em 2002, definiu-se o quarto pilar para o desenvolvimento sustentável: a diversidade cultural. Esta quarta dimensão coloca um novo desafio à Sustentabilidade, que consiste na integração e valorização do património existente (ICOMOS, 2011). A aplicação deste objetivo à indústria da construção deverá passar por uma aposta na reabilitação.

Existem várias ferramentas amplamente aceites para avaliação da sustentabilidade de edifícios, tais como o SBtool, o LEED e o BREAM. Cada uma destas ferramentas atribui um conjunto diferenciado de pesos a factores determinados de valorização da sustentabilidade do edifício ou do conjunto edificado, incluindo as três dimensões que a compõem (Mateus, 2009). Estes métodos incluem uma percentagem significativa de parâmetros subjetivos na avaliação, uma vez que incorporam valores dificilmente mensuráveis, que poderão ser, por exemplo, a satisfação dos utilizadores, os impactos na comunidade local, ou outros. Por essa razão, cada ferramenta deverá ser adaptada à realidade, aos valores e às necessidades de cada país ou tipo de edifício, existindo múltiplos sistemas diferentes e manifesta escassez de consenso sobre a sua aplicação (Mateus, 2009).

A construção é um processo complexo, que se inicia na extração das matérias-primas, à qual se segue a sua transformação de forma a produzir materiais de construção e o processamento desses materiais em obra, de forma a construir o edifício. Após a construção, o edifício será utilizado por um determinado período, correspondente com frequência a várias dezenas de anos. Durante este período, o edifício é utilizado segundo determinados parâmetros de conforto, necessitando para isso de energia para climatização e produção de águas quentes sanitárias, assim como operações de manutenção, que variam substancialmente consoante os materiais que o compõem e as opções tomadas pelo utilizador. A tendência é para a dilatação cada vez maior do período de utilização do

---

edifício, com operações de conservação e reabilitação de grande envergadura, que restituem, e frequentemente até melhoram, as condições iniciais de habitabilidade da construção. No entanto, mesmo que por vezes esse cenário seja difícil de imaginar pela distância temporal que comporta, é de prever que todos os edifícios acabem por ser desmantelados e que os materiais que o constituem prossigam o seu ciclo de vida. Nesta fase, alguns dos materiais serão reutilizados, outros reciclados e incorporados na produção de novos materiais, e outros ainda depositados em aterros sanitários, onde sofrerão um processo natural de decomposição. Todas estas fases incluem o consumo de energia para operação dos equipamentos, assim como fluxos de transporte.

A avaliação da sustentabilidade deverá ter em conta os três pilares definidos inicialmente, aplicados a todas as fases da vida do edifício. Por vezes, o objectivo e outras limitações de estudos deste tipo levam à assunção de limites mais reduzidos para a análise, excluindo alguma das dimensões, ou mesmo algumas fases do ciclo de vida de um produto. Ao mesmo tempo, consoante os objectivos de cada estudo particular, podem ser atribuídos diferentes níveis de importância a cada uma das dimensões da sustentabilidade.

### 3.1 Avaliação de Ciclo de Vida

Nos casos em que o objetivo seja aferir os impactos ambientais e/ou económicos de um produto, excluindo factores de ordem subjetiva, estão disponíveis ferramentas de quantificação objectiva: o LCA (ou ACV, em português) e o LCC. Os dois campos de aplicação mais importantes da ACV são: a análise da contribuição das diversas fases de ciclo de vida para o impacto global do produto (neste caso, do edifício), tendo como objectivo a definição de prioridades no processo de seleção de materiais, ou, por outro lado, o estabelecimento de comparações entre diferentes produtos, para comunicação interna ou externa à empresa (Mateus, 2009).

Esta metodologia responde à necessidade de avaliar os impactos durante um período de tempo a seleccionar, que normalmente se inicia na recolha dos materiais necessários à produção do bem, e pode terminar na “porta” da fábrica, incluindo apenas os impactos associados com a fase de produção, numa abordagem *cradle-do-gate*, ou estender-se temporalmente até ao fim da vida útil do produto, *cradle-to-grave*, ou ainda, mais recentemente, incluir a consideração do ciclo fechado de vida dos materiais, considerando a sua reciclagem para produção de novos produtos, numa abordagem *cradle-to-cradle*.

Existem várias normas que têm como objectivo regular e normalizar os processos de avaliação de ciclo de vida. A série ISO 14000 refere-se a vários aspectos de gestão ambiental. Em particular,

---



as normas ISO 14040 e ISO 14044 definem os princípios e as linhas orientadoras segundo as quais se devem organizar as avaliações de ciclo de vida de produtos.

Os programas informáticos destinados à avaliação de ciclo de vida são desenhados de acordo com estas normas. No entanto, é imprescindível que o utilizador as conheça e respeite, de forma a obter resultados credíveis e válidos.

A Avaliação de Ciclo de Vida (ACV) foi um processo desenhado inicialmente para avaliar o desempenho de produtos com um âmbito relativamente reduzido, tal como produtos industriais, numa perspectiva *cradle-to-gate*, ou seja, desde a aquisição das matérias-primas até à saída do produto da fábrica. Neste caso, o objectivo seria otimizar o processo produtivo, diagnosticando as fases e materiais responsáveis pelos maiores consumos de energia ou as emissões poluentes mais relevantes. Este conceito foi se alargando progressivamente, com a ambição de cobrir toda a vida útil do produto, incluindo a sua utilização e fim-de-vida, o que dilata de forma significativa as fronteiras do sistema. Também a aplicação do método a unidades funcionais complexas, como os edifícios, levanta dificuldades que ainda não estão totalmente ultrapassadas, dado que os edifícios são únicos no seu tamanho, complexidade e longevidade (Perez-Garcia e Lippke, 2005).

Uma extensa revisão dos procedimentos, metodologias e sugestão de futuros desenvolvimentos para a prática de ACV foi publicada em 2009 por Finnveden et al. (2009). O autor deixa claro que esta revisão tem o objectivo de complementar e atualizar outras anteriormente publicadas, até 2004. De entre os assuntos relevantes que foca, destacam-se os seguintes:

- i) A diferença entre ACV “atribucional” e “consequencial”: a primeira foca-se na descrição dos fluxos relevantes para o ambiente, enquanto a segunda tem como objectivo descrever de que forma estes fluxos se alteram perante várias decisões possíveis. A opção entre estes dois tipos de ACV deve ser coerente com os objectivos do estudo, e por isso deve ficar bem definida logo numa fase inicial.
- ii) Apesar de se verificar algum investimento recente em investigação para a proposta de sistemas de normalização e de pesos que ajudem a caracterizar os impactos do ciclo de vida de um produto ou serviço, o autor ressalva que a opção por um destes sistemas continua a ser subjetiva, uma vez que incorpora valores sociais e políticos. Apesar de estes passos serem importantes para a eficiente comunicação dos resultados, exigem especial atenção e têm aplicação normativamente limitada quando o objectivo é tornar os estudos acessíveis ao público.

- iii) Os objectivos da aplicação da ACV devem ser bem definidos, dado que são fundamentais para justificar as opções metodológicas, as fronteiras do sistema e os métodos de caracterização adoptados. A viabilidade de execução de uma ACV em tempo útil, com orçamento limitado, depende da correta definição do âmbito e objectivos. Caso contrário, o estudo pode estender-se indefinidamente e tornar-se inconclusivo.
- iv) Os últimos anos têm trazido novas finalidades e novos interessados em análises deste tipo: os decisores e o ensino, que são os alvos já tradicionais deste tipo de estudos; os distribuidores de produtos, que necessitam de análises ACV para informar os seus consumidores, cada vez mais atentos às questões ambientais; a nível político também cresceu o interesse nesta prática, sendo já em alguns países efectuadas análises ACV que determinam, por exemplo, a taxa de imposto a aplicar a determinados produtos como, por exemplo, os combustíveis.

### 3.2 Avaliação de Ciclo de Vida aplicada a Edifícios

Existem numerosas publicações recentes sobre a aplicação de metodologias ACV a edifícios, apesar de esta norma (ISO 14040) não ter sido formulada especificamente para “produtos” com este nível de complexidade. Algumas das publicações incluem análises de sensibilidade em que se introduzem variações ao nível, por exemplo, dos materiais de construção ou da localização do edifício, com vista a aferir o impacto de cada particularidade, de forma isolada.

Rossi (2012) aplicou a metodologia ACV a dois casos de estudo: um primeiro edifício com dois diferentes sistemas construtivos (aço enformado a frio e tijolo maciço) e um segundo edifício, em que se variou a localização, entre três climas muito diferentes (Portugal, Suécia e Bélgica). À semelhança dos restantes estudos deste género, a autora procede a uma simulação teórica, efetuando cálculos a partir de valores de referência publicados em bases de dados aceites na comunidade científica. Para validar os resultados, através de um processo semelhante a uma triangulação, efetua os mesmos cálculos utilizando dois diferentes conjuntos de bases de dados: em primeiro lugar, usando uma combinação de dados provenientes do *BEES*, uma base de dados Norte-Americana; em segundo lugar, combinando valores extraídos do *Inventory of Carbon & Energy database of the University of Bath* com o *EcoInvent*. Relativamente à madeira contida nos edifícios que analisa, apesar de este não ser o material dominante em nenhuma das alternativas propostas, a autora aponta

que a avaliação do seu desempenho é prejudicada pela fase relativa ao fim-de-vida do material, devido ao facto de que o sistema de avaliação utilizado não considerar a sua reciclagem, mas sim a sua combustão para produção de energia, o que liberta CO<sub>2</sub> para a atmosfera, aumentando o potencial de aquecimento global. Por outro lado, os produtos de aço assumem vantagem neste estudo, uma vez que é considerada a sua reciclagem. Estas observações alertam para os riscos da subjetividade na prática da ACV. Os cenários definidos pelo investigador e as limitações do sistema de análise são determinantes para a fiabilidade dos resultados, pelo que a sua definição carece de atenção, rigor e coerência.

Como conclusão, Rossi (2012) realça a proporção inversa que existe entre a importância da eficiência energética do edifício e o peso da energia incorporada nos seus materiais: de facto, quanto menor é a percentagem de emissões associadas ao período de utilização do edifício (climatização e outros consumos), maior é a importância relativa dos impactos associados aos materiais utilizados na construção. Visto que as políticas energéticas são cada vez mais restritivas, é de esperar um aumento da importância da fase de construção no balanço energético da totalidade da vida do edifício, pelo que o foco do projetista deverá passar a incidir sobre o desempenho ambiental dos materiais utilizados. A segunda grande conclusão deste estudo é que a fonte de energia disponível na região de implantação do edifício é decisiva para o balanço dos impactos relativos à fase de uso. No estudo efectuado, apesar de a Suécia apresentar valores mais elevados de energia para climatização, esta maior quantidade produz menores impactos do que a mesma habitação, mantida com as mesmas condições de conforto, quer em Coimbra, quer em Bruxelas, onde os climas mais amenos se traduzem em menores consumos. Estes resultados devem-se ao facto de que na Suécia existe um tipo de energia disponível para aquecimento nas comunidades, o *District Heating*, que aproveita a energia térmica produzida nas indústrias locais, complementada com o uso de combustíveis, por vezes renováveis, que se traduz num impacto ambiental muito baixo para climatização dos edifícios. Os impactos ambientais associados à fonte de energia utilizada são, neste caso, um factor externo ao próprio edifício. Poderá discutir-se a importância e legitimidade da sua inclusão na ACV de um edifício, uma vez que, enquanto elementos externos, poderão sofrer alterações durante a fase de utilização, que se estende por 50 ou 100 anos, sendo conhecida a rapidez com que surgem inovações nos processos de produção de energia. No entanto, o maior ou menor consumo energético de um edifício está intrinsecamente relacionado com os materiais e processos construtivos utilizados, pelo que o seu comportamento térmico é uma característica que deve ser simulada e analisada para determinação do desempenho global de uma dada construção.

---

### 3.2.1 Avaliação de Ciclo de Vida de Edifícios de Madeira

Um dos autores mais frequentemente citados na bibliografia sobre ACV de edifícios de madeira é Buchanan (1999). A conclusão mais citada deste estudo é que a baixa quantidade de energia proveniente de combustíveis fósseis necessária ao fabrico dos materiais de construção à base de madeira é mais significativa do que a própria quantidade de carbono armazenada nos produtos de madeira. Para chegar a esta conclusão, o autor começa por inventariar as quantidades de energia e dióxido de carbono incorporadas em vários materiais, assim como as emissões de dióxido de carbono associadas à sua produção. Utiliza o exemplo da construção típica da Nova Zelândia, para demonstrar as vantagens do incremento da utilização da madeira em construção, em detrimento do betão e do aço. Este autor refere que o CO<sub>2</sub> contido nos tecidos da madeira apenas se volta a libertar para a atmosfera quando o material é sujeito a combustão, decomposição, ataque por fungos ou insectos. O tempo de vida dos produtos derivados da madeira determina a relevância do seu papel como dispositivo de armazenamento de CO<sub>2</sub>, uma vez que este componente acaba por voltar à atmosfera no final da vida útil do produto, sendo o armazenamento um benefício temporário. O estudo assume que o tempo médio de vida dos desperdícios de madeira e da madeira utilizada para combustão é de um ano, a duração do papel é, em média, três anos e a duração dos produtos de madeira maciça é, em média, de 40 anos.

Respeitando os pressupostos acima enunciados, Buchanan (1999) analisa vários tipos de edifícios, apresentando um conjunto de casos de estudo mais extenso e diversificado do que outros autores, tentando estabelecer um padrão de resultados em função de uma série de tipologias funcionais. Para cada tipologia, define um mínimo de duas opções estruturais, sendo uma delas madeira. Considera apenas a energia incorporada nos materiais, excluindo a fase de operação do edifício. Embora em diferentes proporções, a opção de construção em madeira apresenta sempre vantagem a nível de balanço de carbono e consumo de energia fóssil no ciclo de vida. O autor conclui com valores ilustrativos para o contexto da Nova Zelândia: colocando a hipótese de aumentar o uso da madeira em construção (não só para fins estruturais, mas também em acabamentos e caixilharia) numa percentagem de 17% em relação aos valores usuais (e, com isso, aumentando 17% a quantidade de carbono armazenado temporariamente), o decréscimo das necessidades de energia no sector atinge os 20%, assim como as emissões de CO<sub>2</sub> da indústria da construção, que também serão reduzidas na percentagem de 20%. Na globalidade das emissões de dióxido de carbono do país, esta mudança representa uma redução de 1,8%. Buchanan (1999) sublinha que estes valores não podem ser extrapolados para outros países, embora possam constituir

---

uma referência. Acrescenta ainda que, se esta mudança fosse aplicada à escala global, seria necessário explorar uma maior área florestal. Alerta para os devidos cuidados, de forma a não sobrecarregar a pressão sobre este sector.

A aplicação de metodologias de ACV a edifícios com estrutura em madeira levanta algumas dificuldades, por exemplo as enumeradas por Perez-Garcia & Lippke (2005):

- O largo período de tempo envolvido no processo, desde a criação das sementes, plantação, cultivo e abate das árvores, até ao final da vida do edifício, período que se pode traduzir em largas dezenas ou mesmo algumas centenas de anos. A larga margem temporal constitui frequentemente uma importante dificuldade a ultrapassar para conseguir efetuar uma ACV conclusiva em tempo útil.

- A alocação do processo de gestão florestal a uma grande diversidade de produtos e funções desempenhadas por uma floresta, tais como: o auxílio à regulação do ciclo da água, que é por si só uma capacidade difícil de quantificar; o papel ativo que a floresta tem na manutenção da biodiversidade de uma determinada região; a capacidade de armazenamento de elevadas quantidades de dióxido de carbono, quer nas árvores propriamente ditas (com partes que não são correntemente utilizadas para produção de materiais de construção, tais como as raízes, ramos de pequenas dimensões, folhas..), quer na biomassa constituída pela vasta quantidade de matéria depositada nos solos florestais; os coprodutos retirados da floresta (como por exemplo a água, determinadas atividades de recreio, o crescimento de frutos silvestres, cogumelos, mel e outros alimentos) e ainda a alocação da produção de madeira a todos os coprodutos que serão produzidos com essa mesma matéria.

Perez-Garcia e Lippke (2005) comparam duas habitações com estrutura em madeira, que são contrapostas com alternativas em betão e aço leve, para implantação em duas cidades diferentes dos Estados Unidos da América. Estes autores propõem-se a determinar, numa perspectiva ambiental, se os produtos originários das florestas têm vantagem em relação a outros produtos similares de uso na construção residencial. Na prossecução da ACV, seguiram o protocolo definido pela CORRIM (*Consortium for Research on Renewable Industrial Materials*), que se baseia na norma ISO 14040 para Avaliação de Ciclo de Vida, numa abordagem cradle-to-grave, ou seja, do “berço à cova”, considerando todos os processos envolvidos desde a aquisição das matérias primas, produção dos materiais de construção, processos envolvidos na edificação, período de utilização do edifício e, por fim, o seu desmantelamento. O estudo utilizou a estrutura da ACV para avaliar os potenciais impactos ambientais das várias alternativas propostas para a construção da mesma habitação. Foram definidas duas soluções de habitação “padronizadas” para cada um dos dois climas em análise,

---

sendo sempre uma das opções em madeira. As emissões foram traduzidas em índices de desempenho ambiental, para simplificação da comunicação e interpretação. Relativamente aos resultados, estes autores concluem que a substituição do betão pela madeira representa um decréscimo de 75% da massa de material utilizado, o que é apenas uma das razões que justificam as vantagens em todos os índices de desempenho ambiental, exceto no indicador relativo ao consumo de água, que não sofreu alteração. O consumo de energia incorporado nos produtos utilizados é 250% superior na casa de betão, quando comparada com a casa de madeira. O estudo conclui que o projeto baseado nas propriedades intrínsecas dos materiais pode ter um influência significativa na sustentabilidade do produto final. Para o clima mais ameno estudado, as emissões de dióxido de carbono ao longo de todo o período de vida-útil da habitação não ultrapassam a quantidade de carbono “armazenado” na madeira da construção, tal como havia já sido notado por Buchanan (1999), num outro caso de estudo para uma localização geográfica distinta.

Outro exemplo da aplicação da metodologia de avaliação de ciclo de vida a edifícios de madeira, comparando o seu uso com um material alternativo, é o estudo de Borjesson e Gustavsson (2000). Estes autores propõem-se a estimar quais os fluxos de dióxido de carbono e metano associados à utilização de madeira e betão como materiais de estrutura em edifícios, assim como quantificar a emissão de gases com efeito de estufa associada a diferentes estratégias de exploração florestal. Como metodologia, optam por um caso de estudo, pretendendo obter valores relativos ao impacto da substituição da estrutura de madeira por uma estrutura em betão, com base em cálculos teóricos. A partir da análise de um caso particular, os autores pretendem obter dados generalizáveis a um contexto mais alargado, a realidade Sueca. Como resultado, obtêm que a madeira presente no edifício contém 44 toneladas de carbono; os desperdícios de madeira resultantes do processamento do material corresponde a 44 toneladas adicionais (considera que a produção de 1 m<sup>3</sup> de madeira cortada em dimensões standard para construção consome 2 m<sup>3</sup> de madeira em tronco), ao que se juntam 22 toneladas correspondentes a desperdícios do abate, o que faz o valor global de dióxido de carbono contido na madeira necessária ao edifício ascender às 110 toneladas. É assumido o cenário de utilização integral dos desperdícios para produção de energia, em substituição de combustíveis fósseis. No caso da construção em betão, os autores consideram que as mesmas 110 toneladas de madeira, como já existem na natureza mas não são usadas na construção, são conduzidas para a produção de energia ou mantidas na floresta para armazenamento de carbono. O fim-de-vida do edifício é o principal factor que contribui para da emissão de gases com efeito de estufa: a decomposição da madeira faz com que o carbono incluso nos seus tecidos volte à atmosfera. No entanto, existem vários factores que condicionam a velocidade de decomposição da madeira em

---

aterro, nomeadamente a sua composição química (nomeadamente, a quantidade de lenhina), a composição dos restantes resíduos do aterro que interagem com a madeira, a quantidade de água presente e a temperatura média. Em média, os autores consideram que apenas 20% da madeira depositada em aterro se decompõe. Assumem ainda que 70% do gás produzido nos aterros da Suécia é recolhido e utilizado para produção de energia, reduzindo assim a dependência de combustíveis fósseis. Sugerem como solução ótima a construção com estrutura em madeira e utilização dos desperdícios na produção de biocombustível. Quanto mais alargado for o período de análise considerado (incluindo mais ciclos de florestação, correspondendo a cada um, na Suécia, uma média de 100 anos), mais vantajoso se mostra o uso da madeira em detrimento do betão, chegando a ser 3 a 5 vezes mais eficiente. Concluem que a comparação entre diversos métodos de exploração florestal é extremamente complexa e que a perspectiva temporal afecta significativamente os resultados. Sugerem como estudo futuro uma análise económica dos mesmos processos.

Mas nem todos os autores revistos obtêm resultados que recomendam o incremento do uso da madeira. Um estudo muito recente propõe-se a comparar edifícios de madeira com edifícios de betão, com foco no sistema de energia (Nassén et al., 2012). Este autor tenta determinar, por um lado, se os edifícios com estrutura em madeira têm sempre melhor balanço de carbono do que os edifícios com estrutura em betão e, por outro lado, se a substituição da estrutura de madeira por estrutura em betão é favorável, numa perspectiva de custos, às políticas de prevenção das alterações climáticas. Pretende ainda deixar algumas considerações sobre a forma como a eficiência de custos é afectada pelo desenvolvimento tecnológico nos sistemas de produção de energia. No estudo que apresenta, define diferentes cenários para análise de casos de estudo, em que varia os custos futuros da energia e das emissões de dióxido de carbono -assume que existe uma taxa penalizadora a cobrar pelas emissões de CO<sub>2</sub>. Estes cenários são aplicados a dois casos de estudo de diferentes países (Finlândia e Nova Zelândia), de forma a obter resultados que possam ser generalizáveis. Uma relação interessante que Nassén et al (2012) se propõe a analisar nos dois casos de estudo, é a diferença de massa que representa a passagem do betão para a madeira. De facto, para o mesmo edifício (o caso finlandês), a substituição da madeira pelo betão representa um acréscimo de 16 vezes a massa de material necessária à construção do edifício – ou seja, para substituir cada tonelada de madeira, são necessárias 16 toneladas de betão. No caso estudado para a Nova Zelândia, esta relação é de 1 tonelada de madeira para 8,8 toneladas de betão – menos expressiva, mas ainda assim relevante. Como resultado, o autor afirma que, apesar das vantagens no balanço de carbono do edifício com estrutura em madeira, a estrutura de betão é mais equilibrada na relação custo-

---

eficiência. Mesmo considerando um custo associado às emissões de CO<sub>2</sub>, o balanço de custos ao longo da vida útil do edifício não parece sustentar inequivocamente que a estrutura em madeira é uma melhor opção. Aponta ainda que a biomassa (neste caso concreto, a madeira) é um recurso limitado, que poderá ter uma relação custo-benefício mais equilibrada se utilizada, por exemplo, no sector energético, como alternativa aos combustíveis fósseis.

### 3.3 Programa informático de ACV - BEES

Há alguns anos atrás, o único software disponível para apoio às decisões relacionadas com a sustentabilidade da construção, eram as ferramentas de simulação energética. No entanto, atualmente existem já outros programas que permitem processar e agregar informação relativa à produção dos materiais utilizados na construção, quer no que respeita às matérias-primas utilizadas no seu fabrico, quer aos processos envolvidos na transformação. Estes programas baseiam-se em bases de dados, cuja precisão e credibilidade depende da sua atualização e dos dados fornecidos pelos fabricantes, entre outros aspectos relacionados com o rigor e detalhe da modelação do ciclo de vida no software, que podem ter influência na sua validade.

A metodologia do *BEES* quantifica o desempenho ambiental de vários produtos, considerados isoladamente, usando uma abordagem do tipo *LCA – Life-cycle Assessment*, ou seja, Avaliação de Ciclo de Vida. No que respeita ao desempenho ambiental, a Avaliação de Ciclo de Vida é regulada pela norma ISO 14040. Para avaliação do desempenho económico, este software utiliza a norma *ASTM – International Standard Life-cycle cost (LCC)*. Estas duas avaliações de desempenho, ambiental e económico, são sintetizadas num valor global de desempenho do produto, de acordo com a norma *ASTM – Multiattribute Decision Analysis*, mais precisamente utilizando a classificação *UNIFORMAT II*, específica para elementos construtivos (Lippiat, 2007).

O âmbito definido pelo programa é *cradle-to-grave*, assumindo que todas as fases da vida do produto geram impactos ambientais, e devem por isso ser consideradas na avaliação dos impactos. O que distingue a Análise de Ciclo de Vida de outros estudos de impacto ambiental é a sua abrangência e multidimensionalidade. A redução desta complexidade a valores comparáveis entre si, implica a normalização de valores expressos em diferentes unidades, para obtenção de uma pontuação normalizada que expresse a globalidade dos impactos.

Para cada produto apresentado, o programa define as fronteiras do sistema de acordo com a realidade americana. O *BEES* exclui, nos seus cálculos, os processos que têm uma contribuição

---



muito reduzida para o produto final, com o objectivo de tornar exequível uma contabilização que, sendo exaustiva, poderia comprometer a agilidade da implementação da metodologia, e consequentemente a obtenção dos resultados desejados.

No cálculo dos impactos associados à utilização de materiais de acabamento para coberturas, isolamento térmico de paredes e acabamento exterior de paredes, o *BEES* solicita ao utilizador a definição de um tipo de clima (expresso num leque de cidades americanas disponíveis) e de um tipo de combustível utilizado para aquecimento (de entre três disponíveis), sendo o arrefecimento considerado, por defeito, eléctrico.

### **3.4 Sentido de Evolução das Metodologias de ACV**

A avaliação da sustentabilidade é uma área de investigação recente, e por isso ainda sujeita a um processo de evolução com vista a colmatar as suas limitações e dificuldades de implementação. Loh et al. (2010) desenvolveu uma ferramenta de apoio à decisão em fase de projeto, a EATT, que incorpora o conceito de Análise de Ciclo de Vida, entre outros, desde o início do processo. A metodologia utilizada no seu estudo consiste na análise detalhada das ferramentas e bibliografia existente para apoio aos clientes e arquitetos na decisão entre as várias opções de projeto, para detectar aspectos a melhorar; realiza também uma pequena série de entrevistas e trabalho de campo, para analisar a forma como o projeto se desenrola num escritório de arquitetura que define como “típico”. Assume a generalização a partir do levantamento de um caso particular, embora admita as fragilidades e descreva algumas possíveis variações, relacionadas em especial com a dimensão das empresas de projeto. Inclui um arquiteto na equipa que desenvolve o programa informático, de modo a assegurar – mais uma vez, através de uma generalização – que o programa é de fácil utilização e produz resultados úteis e facilmente interpretáveis pelas equipas de projeto. No final, reconhece que a validação da ferramenta que propõe carece de maior experimentação, em especial através da sua aplicação extensiva em projetos “reais”. A ferramenta que desenvolve apoia-se no sistema de passos estabelecido pela associação dos arquitetos britânicos (RIBA) para a prossecução de um projeto, desde a fase de definição dos objectivos pelo cliente, até à definição de todos os detalhes do projeto, na fase de preparação de obra em que todos os materiais e processos são quantificados e contabilizados. A ferramenta que apresenta tem como base o programa “Microsoft Excel”, e inclui no processo de decisão 3 painéis de avaliadores: os projetistas, consultores especializados em gestão sustentável, e a entidade que encomenda o projeto. Cada um destes painéis define um sistema de pesos, que estabelece uma determinada ponderação para os diversos

---

factores que concorrem para a avaliação do projeto, como por exemplo: valor estético, funcionalidade, disponibilidade de materiais, entre outros. Um aspecto muito interessante referido por este autor é a possibilidade de incorporação dos métodos de ACV com o sistema de modelação BIM (*Building Information Modeling*) para edifícios. Na verdade, o sistema BIM permite que o projeto do edifício seja uma simulação tridimensional de todos os seus componentes, o que se traduz em vantagens ao nível da coordenação de especialidades e minimização dos erros de projeto, ao mesmo tempo que permite a quantificação precisa de todos os materiais necessários à construção. Se este sistema é já utilizado para apoio ao orçamento, será viável usá-lo como base para a simulação dos impactos ambientais do edifício ao longo de toda a sua vida útil, em especial quando combinado com software de simulação do comportamento térmico do edifício, que permite efetuar um balanço energético para a sua fase de operação.

Tal como apontado por Loh et al (2010), o futuro da avaliação de ciclo de vida, para garantir a sua implementação eficaz desde a fase de projeto, poderá passar pela inclusão de ferramentas de ACV no software de modelação BIM. Wang et al (2011) apresenta um caso de estudo em que uma metodologia deste tipo foi adoptada, com vista a avaliar o potencial de utilização de uma modelação BIM como base para efetuar uma ACV. Este autor aponta como principal vantagem desta metodologia o rigor da informação, uma vez que esta é fornecida por consequência direta da modelação do projeto, evitando assim a trabalhosa recolha de inventário que tradicionalmente antecede as ACV. O autor pretende medir dois indicadores: as emissões de CO<sub>2</sub> e o consumo de energia ao longo do ciclo de vida do edifício. Para determinar os níveis de CO<sub>2</sub> na fase de construção, utiliza o software *BuildCarbonNeutral*. Com vista a simular o comportamento térmico e consequente consumo de energia para manter um dado padrão de conforto ao longo do ano, exportou o modelo BIM para o software *Ecotect*, que permite efetuar uma simulação completa e rigorosa do comportamento térmico de um edifício, para um dado clima, orientação e nível de conforto pré-determinados. Os resultados obtidos são representados na Figura 3.1 (consumo de energia) e Figura 3.2 (emissões de CO<sub>2</sub>).

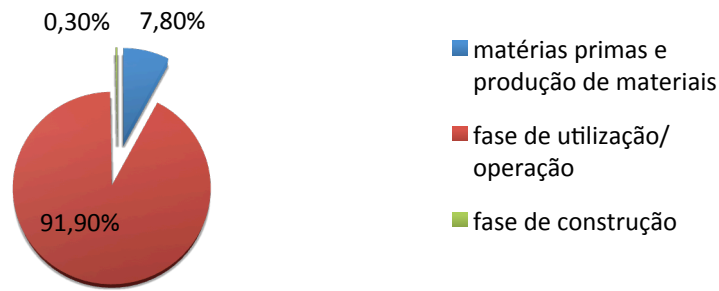


Figura 3.1 - Distribuição do consumo de energia ao longo do ciclo de vida do edifício (Wang et al., 2011)

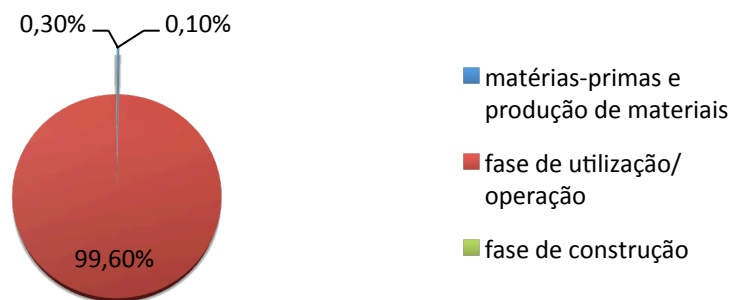


Figura 3.2 - Distribuição das emissões de CO<sub>2</sub> ao longo do ciclo de vida do edifício (Wang et al., 2011)

O autor conclui que o processo de utilização do modelo tridimensional para efetuar a ACV tornou a avaliação das emissões um processo expedito, com resultados altamente fiáveis. A exequibilidade do processo permitiu-lhe testar diferentes configurações e orientações para o seu edifício, e desta forma seleccionar a opção mais adequada, ainda numa fase inicial do projeto.

### 3.5 Síntese do Capítulo

A Análise de Ciclo de Vida (ACV) é uma metodologia de quantificação objectiva dos impactos de uma determinada unidade funcional, regulamentada pelas normas da série ISO 14000. Esta metodologia não foi especialmente desenhada para avaliar edifícios, que são “unidades funcionais” complexas pela quantidade de materiais e processos envolvidos, e também pela alargada escala temporal do seu ciclo de vida.

Esta complexidade é exponenciada na avaliação de edifícios de madeira, pela dificuldade de consideração de processos alargados no tempo e no espaço, como são a florestação e o ciclo do carbono.

O futuro da ACV passará provavelmente pela agilização da sua inclusão em fases iniciais do projeto, o que poderá ser viabilizado através da sua incorporação nas ferramentas BIM, que permitem a simulação e modelação “virtuais” do edifício.

#### 4. CASO DE ESTUDO 1

O primeiro caso de estudo utiliza o software *BEES* para determinação dos impactos relacionados com todos os elementos construtivos de uma habitação pré-definida. O objectivo desta ACV é comparar, de forma expedita e utilizando uma base de dados acessível ao público em geral de forma livre e gratuita, as diferenças relacionadas com a opção relativa ao material estrutural da habitação: madeira ou aço enformado a frio?

De forma a ser possível comparar a diferença de impactos relacionada com as duas opções para o sistema estrutural, são ensaiadas duas versões para a ACV de um mesmo edifício, em que apenas se varia o sistema estrutural. Para uma correta percepção do impacto da variação do sistema estrutural, na globalidade dos materiais presentes na habitação, é definida a composição de todos os elementos construtivos do edifício, a constar de ambas as versões.

O edifício definido com caso de estudo é uma moradia unifamiliar isolada de dois pisos, situada em Kiruna, na Suécia. A análise do desempenho térmico das duas versões ensaiadas não é incluída presente trabalho, mas encontra-se documentada no artigo em anexo (Coelho et al., 2012).

##### 4.1 Análise de Ciclo de Vida de uma habitação unifamiliar, com base no software *BEES*

O objectivo deste primeiro caso de estudo é quantificar e analisar o impacto ambiental de um edifício de habitação unifamiliar pré-definido, em duas versões que diferem apenas no que diz respeito ao sistema estrutural, de forma a ser possível efetuar uma comparação objectiva entre as duas opções. A quantificação e análise procuram associar dois níveis de desempenho: ambiental e económico. Estes parâmetros são analisados ao longo de todo o ciclo de vida do edifício, nomeadamente iniciando-se na produção de matérias-primas, transporte para a fábrica onde são processadas, produção dos materiais de construção, construção da casa *in situ*, manutenção do edifício por um período de vida útil de 50 anos, culminando no seu desmantelamento e consequente fim-de-vida dos materiais incorporados. Por ultrapassar o âmbito definido para esta análise, não será efectuado o balanço energético da habitação ao longo dos 50 anos de utilização. No entanto, e dada a menor condutividade térmica da madeira quando comparada com o aço, seria de prever um melhor desempenho térmico para a opção que utiliza a madeira como material estrutural (Coelho e Lopes, 2012).

Desta forma, aplicou-se a metodologia ACV a uma habitação unifamiliar, destinada a alojar 4 pessoas por um período de 50 anos. Para determinação das características da construção, foram respeitados os Eurocódigos Estruturais, assim como os regulamentos térmicos e acústicos vigentes.

Trata-se de uma moradia isolada de tipologia T3, com cerca de 180 m<sup>2</sup> (Figura 4.1). No piso térreo, existe uma área coberta destinada a estacionamento automóvel, assim como uma zona de arrumos exterior. A entrada na habitação faz-se através deste piso, acedendo-se a uma zona de entrada e circulação. Esta zona permite o acesso à cozinha, ao sanitário de serviço e à sala comum, assim como à escada que dá acesso ao piso superior. A cozinha comunica com um pequeno pátio exterior, coberto, de apoio às funções de lavandaria. É ainda servida por dois painéis de correr que permitem dividir a zona destinada a confecção de alimentos, da zona de tratamento de roupa, assim como encerrar a cozinha relativamente às zonas de circulação e ao resto da casa. A sala comum comunica, através de um painel de correr que pode individualizar ou conectar os dois espaços, com uma zona de escritório. O piso superior (Figura 4.2) concentra todas as funções associadas ao uso privado da habitação, nomeadamente três quartos e duas instalações sanitárias completas. Uma destas instalações sanitárias configura-se como acessível, ou seja, permite a eventual utilização por pessoas com mobilidade condicionada. Um dos quartos é servido por uma zona de terraço exterior.

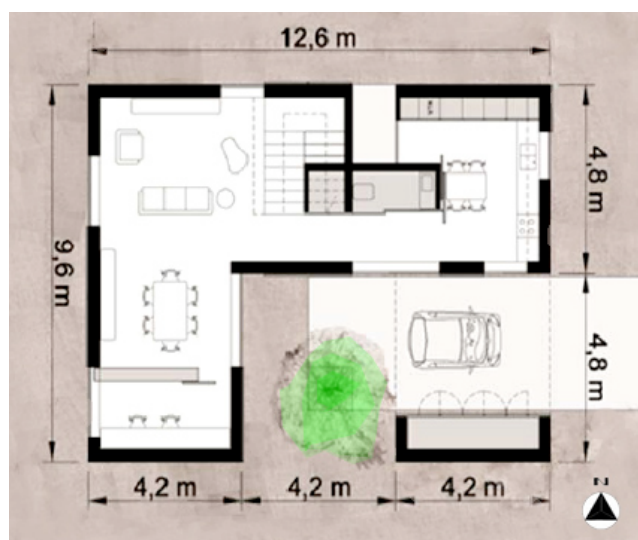


Figura 4.1 - Planta do piso térreo da habitação

A fachada principal está orientada a sul, conforme representado nas imagens. O volume construído configura um pátio em “U” voltado a sul. A cobertura do piso térreo contacta com o exterior na zona correspondente à sala de jantar e escritório, dado que na face superior da laje, no piso 1, se situa um terraço. A laje que separa o piso 0 do piso 1 também contacta com o exterior (neste caso, na sua face inferior) na zona correspondente ao estacionamento automóvel.

---



Figura 4.2 - Planta do primeiro piso da habitação

Relativamente às fenestrações, estas são de sentido vertical, com altura compreendida entre a laje de pavimento e a laje de cobertura, em ambos os pisos (Figura 4.3).

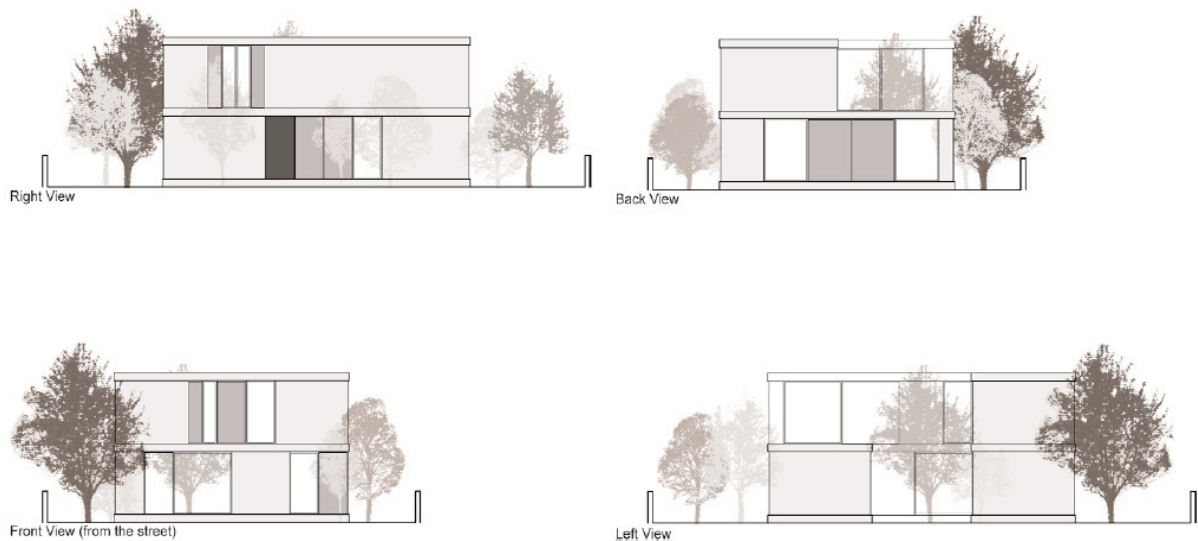


Figura 4.3 - Alçados da habitação

O ciclo de vida do sistema será considerado na sua totalidade (cradle-to-grave). Os impactos ambientais dos produtos usados na construção do edifício serão analisados no conjunto das fases e processos que vão desde a produção das matérias-primas até ao fim-de-vida do edifício, passando por todas as fases intermédias: transporte até ao local da obra, processo de construção, manutenção e utilização do edifício, de acordo com as condições regulamentares, ao longo dos 50 anos

previstos, terminando num cenário de fim-de-vida que poderá ser de reciclagem dos materiais ou a sua deposição em aterro.

A base de dados utilizada no âmbito deste estudo é a do programa norte-americano *BEES* – *Building for Environmental and Economic Sustainability* (ver capítulo 3.3), desenvolvido pelo norte-americano *National Institute of Standards and Technology* (Lippiat, 2007). Este software é de utilização livre, tendo como principal objectivo apoiar a decisão entre várias hipóteses alternativas de materiais para diversas indústrias, em particular a construção, utilizando critérios ambientais e económicos na avaliação, aos quais podem ser atribuídos diferentes pesos, definidos pelo utilizador conforme o objectivo do estudo.

Os materiais e todo o ciclo de vida a estes associado, foram modelados neste programa em função do contexto norte-americano, o que constitui uma limitação à sua utilização em diferentes contextos nacionais. As opções disponíveis para seleção de alternativas limitam-se aos materiais de uso corrente nos Estados Unidos, pelo que poderão, em muitos casos, não corresponder à realidade da construção corrente em Portugal. No entanto, todas as alternativas foram definidas tendo como base informação proveniente da mesma base de dados e utilizando os mesmos critérios e pesos, razão pela qual se pode considerar possível a comparação entre diversas soluções.

O software que serviu de instrumento para a produção da base de dados disponível no *BEES* foi o *SimaPro*. No entanto, os impactos são apresentados já sob a forma de valores finais, não sendo possível alterar os pressupostos que deram origem aos resultados apresentados. No entanto, estes são descritos com detalhe no manual de utilizador.

O ciclo de vida para cada um dos materiais constituintes da construção está pré-definido no programa *BEES* e não pode ser alterado, pelo que a seleção dos materiais constituintes dos elementos construtivos do Caso de Estudo teve como base dois critérios: em primeiro lugar, o desempenho ambiental de cada alternativa, tal como apresentado na base de dados disponível; em segundo lugar, foi dada preferência aos materiais mais conhecidos e de corrente utilização no nosso contexto, de forma a aproximar a abordagem, o mais possível, à perspectiva de uma equipa de projeto.

Na aferição inicial da pontuação global para apoio à seleção entre vários materiais possíveis para cada necessidade construtiva, foram definidos iguais pesos para o desempenho ambiental e económico. Dentro dos indicadores de desempenho ambiental, foram seleccionados os valores relativos atribuídos pela EPA a cada categoria de impacto. Note-se que estes critérios apenas foram considerados na avaliação preliminar global dos produtos, para apoio à seleção de alternativas.

---



Numa segunda fase, foram quantificados os impactos para cada uma das soluções construtivas previamente definidas. Para tal, definiu-se um quadro de ponderação de impactos ambientais de acordo com os objectivos deste trabalho. Para obtenção dos valores relativos ao desempenho ambiental, as seguintes categorias de impacto foram pesadas em partes iguais: Aquecimento Global, Acidificação, Eutrofização, Esgotamento de Combustíveis Fósseis, Qualidade do Ar Interior, Alteração dos Habitats, Saúde Humana, *Smog* e Destruição da Camada de Ozono. No entanto, como se trata de 9 categorias de impacto e o BEES não aceita casas decimais no valor da percentagem atribuída para ponderação de cada uma delas, foi definido o peso de 11% para cada uma das categorias, à exceção da saúde humana, a que foi atribuído o valor de 12%.

De modo a evitar a influência das emissões relacionadas com a fase de transporte de produtos, foi considerada uma distância de 100 milhas (aproximadamente 161 km) para o transporte de todos os materiais.

Nos materiais de isolamento, o *BEES* considera como variável para o cálculo dos impactos ao longo da vida útil do edifício, o consumo de energia para climatização. Por essa razão, solicita a definição de uma cidade norte-americana e a adopção de um tipo de combustível. Para efeitos de simulação, foi considerada a cidade de Chicago. Apesar de ter sido efectuado um esforço de aproximação à realidade do caso de estudo, assumem-se as limitações inerentes ao uso de uma base de dados “fechada” como a do BEES, em que os resultados são já apresentados na sua forma final, possibilidades de parametrização muito limitadas.

#### **4.1.1 Categorias de Impacto Ambiental**

As categorias de impacto analisadas para cada elemento construtivo, tal como referido atrás, são as seguintes: Potencial de Aquecimento Global; Acidificação; Eutrofização; Esgotamento dos Combustíveis Fósseis; Qualidade do ar interior; Alteração dos Habitats; Saúde Humana; *Smog* e Destruição da Camada de Ozono. Em seguida, apresenta-se uma breve caracterização de cada uma destas categorias.

O “Potencial de Aquecimento Global” caracteriza as emissões que contribuem para o efeito de estufa, sendo que o BEES considera para que este impacto ambiental é gerado pelo o seguinte conjunto de gases, nas proporções indicadas na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 - Fatores de Caracterização para a categoria de impacto "Aquecimento Global"

<i>Flow (i)</i>	<i>GWP<sub>i</sub></i> (CO <sub>2</sub> -equivalents)
Carbon Dioxide (CO <sub>2</sub> , net)	1
Carbon Tetrachloride (CCl <sub>4</sub> )	1800
Carbon Tetrafluoride (CF <sub>4</sub> )	5700
CFC 12 (CCl <sub>2</sub> F <sub>2</sub> )	10 600
Chloroform (CHCl <sub>3</sub> , HC-20)	30
Halon 1301 (CF <sub>3</sub> Br)	6900
HCFC 22 (CHF <sub>2</sub> Cl)	1700
Methane (CH <sub>4</sub> )	23
Methyl Bromide (CH <sub>3</sub> Br)	5
Methyl Chloride (CH <sub>3</sub> Cl)	16
Methylene Chloride (CH <sub>2</sub> Cl <sub>2</sub> , HC-130)	10
Nitrous Oxide (N <sub>2</sub> O)	296
Trichloroethane (1,1,1-CH <sub>3</sub> CCl <sub>3</sub> )	140

O “Potencial de Acidificação” refere-se a um tipo de ameaça ambiental relacionada com a presença de compostos à base de enxofre e nitrogénio, que se propagam no ambiente através da água (chuva, humidade...), afectando praticamente todos os ecossistemas. As substâncias que concorrem para a o potencial de Acidificação são consideradas pelo software de acordo com os factores de caracterização indicados na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 - Factores de Caracterização para a categoria de impacto "Potencial de Acidificação"

<i>Flow (i)</i>	<i>AP<sub>i</sub></i> (Hydrogen-Ion Equivalents)
Ammonia (NH <sub>3</sub> )	95.49
Hydrogen Chloride (HCl)	44.70
Hydrogen Cyanide (HCN)	60.40
Hydrogen Fluoride (HF)	81.26
Hydrogen Sulfide (H <sub>2</sub> S)	95.90
Nitrogen Oxides (NO <sub>x</sub> as NO <sub>2</sub> )	40.04
Sulfur Oxides (SO <sub>x</sub> as SO <sub>2</sub> )	50.79
Sulfuric Acid (H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> )	33.30

O “Potencial de Eutrofização” consiste no aumento de minerais (tais como nitrogénio e fósforo) presentes nos ecossistemas, o que pode levar ao excessivo desenvolvimento de certos organismos (por exemplo, o anormal crescimento de algas em ecossistemas aquáticos, que conduzem ao esgotamento do oxigénio disponível), o que se traduz na redução da biodiversidade. As substâncias consideradas pelo BEES no cálculo do Potencial de Eutrofização são as mencionadas na Tabela 4.3.

Tabela 4.3 - Factores de Caracterização para a categoria de impacto "Eutrofização"

<i>Flow (i)</i>	<i>EP<sub>i</sub></i> (nitrogen-equivalents)
Ammonia (NH <sub>3</sub> )	0.12
Nitrogen Oxides (NO <sub>x</sub> as NO <sub>2</sub> )	0.04
Nitrous Oxide (N <sub>2</sub> O)	0.09
Phosphorus to air (P)	1.12
Ammonia (NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> , NH <sub>3</sub> , as N)	0.99
BOD5 (Biochemical Oxygen Demand)	0.05
COD (Chemical Oxygen Demand)	0.05
Nitrate (NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> )	0.24
Nitrite (NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> )	0.32
Nitrogenous Matter (unspecified, as N)	0.99
Phosphates (PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> , HPO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> , H <sub>2</sub> PO <sub>4</sub> <sup>-</sup> , H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub> , as P)	7.29
Phosphorus to water (P)	7.29

O indicador “Esgotamento dos Combustíveis Fósseis” refere-se apenas à disponibilidade deste tipo de combustíveis no solo, não incluindo os impactos associados à sua extração. As emissões associadas ao processo de extração estão incluídas em indicadores distintos, tal como o “Potencial de Aquecimento Global”. Assim, os factores que concorrem para o cálculo deste indicador estão listados na Tabela 4.4.

Tabela 4.4 - Factores de Caracterização para a categoria de impacto "Esgotamento dos Combustíveis Fósseis"

<i>Flow (i)</i>	<i>FP<sub>i</sub></i> (surplus MJ/kg)
Coal (in ground)	0.25
Natural Gas (in ground)	7.80
Oil (in ground)	6.12

A “Qualidade do Ar Interior” é um parâmetro específico da Análise de Ciclo de Vida de Edifícios, não sendo comum em análises a outro tipo de produtos. A preocupação com a qualidade do ar nos ambientes interiores é relativamente recente, pelo que não existe ainda um consenso alargado sobre quais as substâncias a considerar como indicadores para esta categoria de impacto. No entanto, reconhece-se o papel dos compostos orgânicos voláteis na deterioração da qualidade do ar, apesar de a sua quantidade decrescer ao longo do tempo, até deixar de ter significado. Por essa razão, são considerados relativamente mais prejudiciais os produtos que exigem substituição após um determinado período de tempo (quando inferior ao da vida útil do edifício), uma vez que voltam a introduzir-se COV's no espaço habitável, reiniciando o processo de dissipação dos mesmos, o que provoca um novo período de concentração relevante.

A preocupação com este indicador é especialmente válida para os derivados de madeira e materiais de isolamento térmico que contêm formaldeído, acabando este por passar para o interior do edifício. Contudo, o *BEES* considera, na sua modelação, processos recentes de fabrico de OSB e contraplacado, que têm baixo conteúdo deste tipo de substâncias nocivas para a saúde humana, quando comparados com processos mais antigos.

Pelo facto de este ser um assunto pouco estudado, os valores apresentados pelo *BEES* são aproximados, não existindo uma base rigorosa para o seu cálculo.

Relativamente à “Alteração dos Habitats”, este é outro indicador cujo desenvolvimento científico é ainda reduzido, sendo adoptada no *BEES* uma quantificação aproximada, que considera de uma forma geral o uso do solo, sem incorporar variações tais como o tempo necessário ao restabelecimento das condições iniciais, ou mesmo o estado/valor do solo antes da intervenção. É considerado o uso do solo nas fases de instalação, substituição (eventual) e fim-de-vida, na proporção apresentada na Tabela 4.5.

**Tabela 4.5 - Factores de Caracterização para a categoria de impacto "Alteração dos Habitats"**

<i>Flow (i)</i>	<i>TED</i> ( <i>T&amp;E count/m<sup>2</sup></i> )
Land Use (Installation Waste)	6.06E-10
Land Use (Replacement Waste)	6.06E-10
Land Use (End-of-Period Waste)	6.06E-10

A “Saúde Humana” pode ser afectada por múltiplos factores, sendo as suas ameaças por vezes difíceis de caracterizar. O *BEES* considera mais de 200 substâncias no cálculo do impacto de um produto para a saúde humana, das quais se destacam as mencionadas na Tabela 4.6.

Tabela 4.6- Factores de Caracterização para a categoria de impacto "Saúde Humana"

<i>Flow (i)</i>	<i>HP<sub>i</sub></i> (toluene-equivalents)
Cancer--(a) Dioxins (unspecified)	38 292 661 685 580
Noncancer--(a) Dioxins (unspecified)	2 286 396 218 965
Cancer--(a) Diethanol Amine (C <sub>4</sub> H <sub>11</sub> O <sub>2</sub> N)	2 532 000 000
Cancer--(a) Arsenic (As)	69 948 708
Cancer--(a) BenzoCancer--(a)pyrene (C <sub>20</sub> H <sub>12</sub> )	34 210 977
Noncancer--(a) Mercury (Hg)	19 255 160
Noncancer--(w) Mercury (Hg <sup>+</sup> , Hg <sup>++</sup> )	18 917 511
Cancer--(a) Carbon Tetrachloride (CCl <sub>4</sub> )	17 344 285
Cancer--(w) Arsenic (As <sup>3+</sup> , As <sup>5+</sup> )	17 210 446
Cancer--(w) Carbon Tetrachloride (CCl <sub>4</sub> )	16 483 833
Cancer--(a) Benzo(k)fluoranthene	12 333 565
Cancer--(w) Hexachloroethane (C <sub>2</sub> Cl <sub>6</sub> )	8 415 642
Cancer--(w) Phenol (C <sub>6</sub> H <sub>5</sub> OH)	8 018 000
Noncancer--(a) Cadmium (Cd)	4 950 421
Cancer--(a) Trichloropropane (1,2,3-C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> Cl <sub>3</sub> )	3 587 000
Cancer--(a) Chromium (Cr III, Cr VI)	3 530 974
Cancer--(a) Dimethyl Sulfate (C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> O <sub>4</sub> S)	2 976 375
Cancer--(a) Cadmium (Cd)	1 759 294
Cancer--(a) Indeno (1,2,3,c,d) Pyrene	1 730 811
Noncancer--(a) Lead (Pb)	1 501 293
Cancer--(a) Dibenzo(a,h)anthracene	1 419 586
Cancer--(a) Benzo(b)fluoranthene	1 356 632
Cancer--(a) Benzo(bjk)fluoranthene	1 356 632
Cancer--(a) Lead (Pb)	748 316
Cancer--(a) Ethylene Oxide (C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> O)	650 701

O "Smog" é uma reação fotoquímica que ocorre quando uma elevada concentração de poluentes atmosféricos permanece perto da superfície terrestre, reagindo com a luz solar. O *BEEES* considera mais de 100 substâncias para determinar esta categoria de impacto, das quais se destacam as mencionadas na Tabela 4.7.

Tabela 4.7 - Factores de Caracterização para a categoria de impacto "Smog"

<i>Flow (i)</i>	<i>SP<sub>i</sub></i> (nitrogen oxides-equivalents)
Furan (C <sub>4</sub> H <sub>4</sub> O)	3.54
Butadiene (1,3-CH <sub>2</sub> CHCHCH <sub>2</sub> )	3.23
Propylene (CH <sub>3</sub> CH <sub>2</sub> CH <sub>3</sub> )	3.07
Xylene (m-C <sub>6</sub> H <sub>4</sub> (CH <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> )	2.73
Butene (1-CH <sub>3</sub> CH <sub>2</sub> CHCH <sub>2</sub> )	2.66
Crotonaldehyde (C <sub>4</sub> H <sub>6</sub> O)	2.49
Formaldehyde (CH <sub>2</sub> O)	2.25
Propionaldehyde (CH <sub>3</sub> CH <sub>2</sub> CHO)	2.05
Acrolein (CH <sub>2</sub> CHCHO)	1.99
Xylene (o-C <sub>6</sub> H <sub>4</sub> (CH <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> )	1.93
Xylene (C <sub>6</sub> H <sub>4</sub> (CH <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> )	1.92
Trimethyl Benzene (1,2,4-C <sub>6</sub> H <sub>3</sub> (CH <sub>3</sub> ) <sub>3</sub> )	1.85
Acetaldehyde (CH <sub>3</sub> CHO)	1.79
Aldehyde (unspecified)	1.79
Butyraldehyde (CH <sub>3</sub> CH <sub>2</sub> CH <sub>2</sub> CHO)	1.74
Isobutyraldehyde ((CH <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> CHCHO)	1.74
Ethylene Glycol (HOCH <sub>2</sub> CH <sub>2</sub> OH)	1.40
Acenaphthene (C <sub>12</sub> H <sub>10</sub> )	1.30
Acenaphthylene (C <sub>12</sub> H <sub>8</sub> )	1.30
Hexanal (C <sub>6</sub> H <sub>12</sub> O)	1.25
Nitrogen Oxides (NO <sub>x</sub> as NO <sub>2</sub> )	1.24
Glycol Ether (unspecified)	1.11
Methyl Naphthalene (2-C <sub>11</sub> H <sub>10</sub> )	1.10
Xylene (p-C <sub>6</sub> H <sub>4</sub> (CH <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> )	1.09
Toluene (C <sub>6</sub> H <sub>5</sub> CH <sub>3</sub> )	1.03

São conhecidos os efeitos da “Destruição da Camada de Ozono”: aquecimento global, aumento das radiações solares nocivas e consequente aumento da frequência de cânceros de pele, problemas de visão e alterações no sistema imunitário, entre outros efeitos menos “mediáticos”. Os factores de caracterização utilizados pelo BEES para calcular esta categoria de impacto estão listados na Tabela 4.8.

**Tabela 4.8 - Factores de Caracterização para a categoria de impacto "Destruição da Camada de Ozono"**

<i>Flow (i)</i>	<i>OP<sub>i</sub></i> <i>(CFC-11 equivalents)</i>
Carbon Tetrachloride (CCl <sub>4</sub> )	1.10
CFC 12 (CCl <sub>2</sub> F <sub>2</sub> )	1.00
Halon 1301 (CF <sub>3</sub> Br)	10.00
HCFC 22 (CHF <sub>2</sub> Cl)	0.06
Methyl Bromide (CH <sub>3</sub> Br)	0.60
Trichloroethane (1,1,1-CH <sub>3</sub> CCl <sub>3</sub> )	0.10

Os valores absolutos relativos às várias categorias de impacto são expressos em diferentes unidades, dependendo do tipo de substância que representam. De modo a tornar possível a comparação entre o impacto real para o ambiente das diversas categorias, é necessário normalizar os valores. Para tal, foram determinadas “bitolas” que correspondem ao fluxo anual médio, por habitante dos EUA, para cada categoria de impacto. Dividindo o valor absoluto pelo factor de normalização, obtém-se um valor adimensional que permite a comparação entre conceitos diversos, calibrados para o contexto norte-americano. Os valores de normalização adoptados pelo *BEES* são referidos na Tabela 4.9.

**Tabela 4.9 – Valores de normalização para cada categoria de impacto**

<i>Impact</i>	<i>Normalization Value</i>
Global Warming	25 582 640.09 g CO <sub>2</sub> equivalents/year/capita
Acidification	7 800 200 000.00 millimoles H <sup>+</sup> equivalents/year/capita
Eutrophication	19 214.20 g N equivalents/year/capita
Fossil Fuel Depletion	35 309.00 MJ surplus energy/year/capita
Indoor Air Quality	35 108.09 g TVOCs/year/capita
Habitat Alteration	0.00335 T&E count/acre/capita <sup>a</sup>
Water Intake	529 957.75 liters of water/year/capita
Criteria Air Pollutants	19 200.00 microDALYs/year/capita
Smog	151 500.03 g NO <sub>x</sub> equivalents/year/capita
Ecological Toxicity	81 646.72 g 2,4-D equivalents/year/capita
Ozone Depletion	340.19 g CFC-11 equivalents/year/capita
Human Health	274 557 555.37 g C <sub>7</sub> H <sub>8</sub> equivalents/year/capita

<sup>a</sup> One acre is equivalent to 0.40 hectares.

Em suma, as categorias e respectivos pesos considerados para o cálculo do impacto ambiental das soluções, são os representados na Tabela 4.10.

**Tabela 4.10 - Categorias de Impacto consideradas**

CATEGORIAS DE IMPACTO AMBIENTAL	%
Potencial de Aquecimento Global	11,0
Potencial de Acidificação	11,0
Potencial de Eutrofização	11,0
Esgotamento dos Combustíveis Fósseis	11,0
Qualidade do Ar Interior	11,0
Alteração dos habitats	11,0
Saúde Humana	12,0
Smog	11,0
Destruição da Camada de Ozono	11,0
TOTAL	100

#### 4.1.2 Análise de inventário

O sistema construtivo da habitação unifamiliar a definir para prossecução da ACV tentará, o mais possível, utilizar como materiais de construção a madeira e seus derivados. Uma breve consulta às fotos disponíveis no *Google Maps* deixa perceber que este é um tipo de construção corrente não só no Norte da Europa, como também em muitas regiões dos E.U.A. (ver figuras 4.4 e 4.5).



**Figura 4.4 - Zona residencial da cidade de Kiruna, Suécia (fonte: Google Maps)**



Figura 4.5 - Casa em Austin, Texas, Estados Unidos da América (fonte: [www.theluxhome.com](http://www.theluxhome.com))

A opção pela construção com sistema estrutural e outros elementos construtivos em madeira ou seus derivados é frequente nos EUA. Por essa razão, foi possível encontrar no *BEES* a maioria dos materiais utilizados numa construção corrente deste género.

O processo de seleção e as características de cada um dos materiais são descritos de seguida.

#### 4.1.2.1 Sistema Estrutural

O sistema estrutural selecionado tem como material de base a madeira maciça. O *BEES* apresenta um produto específico para este fim, o *generic wood framing*, que é possivelmente o sistema estrutural mais comum nos EUA. Considera que a estrutura é composta por elementos de madeira maciça de secção 3,8 x 8,9 cm e 3,8 x 14 cm, com espaçamento médio de 41 cm entre si.



Figura 4.6 - Exemplo de Estrutura em madeira maciça (fonte: Rusticasa)



Para cálculo dos impactos associados à produção deste material, considera-se o processo de serração da matéria-prima em peças de dimensões standardizadas. Essas peças são, de seguida, submetidas a um processo de secagem em ambiente controlado, até atingirem o conteúdo de humidade em equilíbrio com o ambiente, que ronda os 12%. A madeira é também impregnada com um tratamento insecticida e de preservação, que permite o seu uso para fins estruturais, mesmo em elementos construtivos próximos do solo.

É considerado um período de vida útil de 75 anos para a estrutura. Embora o período de vida útil definido neste caso de estudo seja apenas de 50 anos, o facto de o *BEES* definir uma duração superior não terá influência no resultado, dado que não está previsto nenhum tratamento de manutenção ou substituição para este material.

Os consumos de energia associados incluem desde as estufas para crescimento inicial das árvores antes de serem transplantadas para o local onde irão crescer, a produção do fertilizante necessário e a maquinaria utilizada no abate das árvores, assim como o transporte entre os vários momentos do processo (Lippiat, 2007).

O *BEES* considera que a madeira absorve dióxido de carbono nos seus tecidos, na proporção de 1kg de CO<sub>2</sub> por cada 1,84 kg de madeira já seca (Lippiat, 2007). Quanto ao fim-de-vida, o *BEES* considera que a totalidade da madeira é depositada em aterro. Apesar de reconhecer a evolução e generalização da implementação dos processos de reciclagem, a autora opta por não os incluir na análise, por falta de documentação que sustente as eventuais opções de modelação.

Relativamente à segunda opção estrutural analisada, a base de dados do *BEES* inclui o sistema estrutural que se pretende analisar: aço leve com perfis enformados a frio. Este tipo de estrutura constrói-se a partir de perfis de aço carbono que são moldados à temperatura ambiente, pelo que a energia incorporada no processo de fabrico é relativamente reduzida. Este tipo de estrutura tem diversas vantagens relativamente a outros de uso mais corrente em Portugal, nomeadamente a fácil e rápida montagem, assim como a facilidade de incorporação de redes e instalações. Existe uma série de acessórios que podem ser usados para estabelecer as ligações entre os elementos estruturais, sendo este um sistema totalmente standardizado e de fácil implementação em obra (Figura 4.7).



Figura 4.7 - Exemplo de edifício construído com sistema estrutural em aço leve enformado a frio (fonte: <http://pt.wikipedia.org>)

O programa americano assume um período de vida útil para este tipo de estruturas de 75 anos, embora reconheça que a duração do material pode exceder largamente este valor, pelo facto de o aço ter um tratamento de galvanização. O *BEES* considera ainda que um desperdício médio de 1% de material em obra, sendo que a totalidade desses resíduos segue para reciclagem. Por cada 0,09 m<sup>2</sup> de estrutura (unidade funcional definida pelo programa), considera-se a utilização de 0,056 kg adicionais de aço galvanizado, correspondentes a parafusos. A montagem da estrutura em obra é um trabalho manual, pelo que não é incluído nenhum gasto de energia relativo a esta fase do ciclo de vida do material, o que se traduz em *zero* emissões na fase de construção. Como cenário de *fim-de-vida* do edifício, considera-se que a totalidade do aço segue para reciclagem.

Além do sistema estrutural genérico da casa, e por uma questão de coerência construtiva, também nas paredes interiores a estrutura em madeira foi substituída por estrutura metálica.

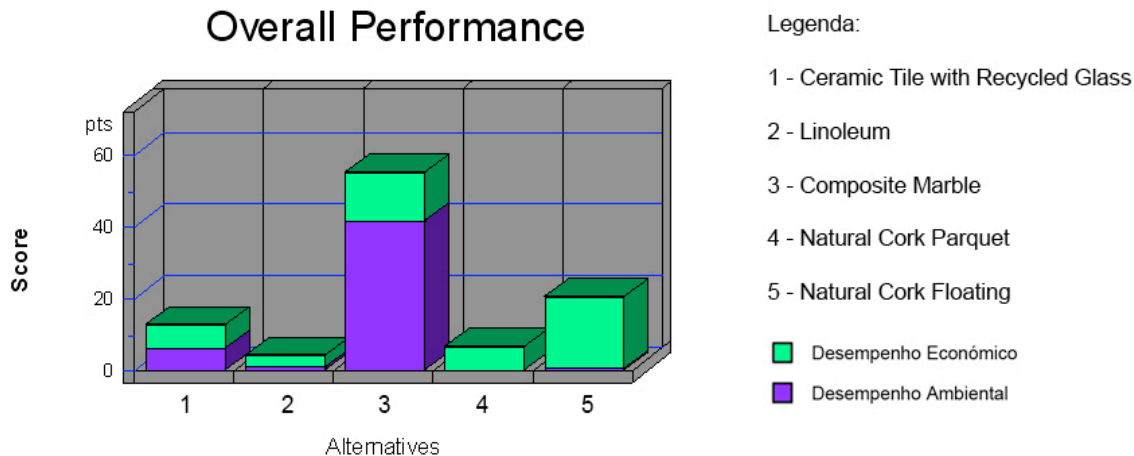
Desta forma, e seguindo a organização proposta para a primeira solução, os elementos construtivos em que foram introduzidas variações são dois: o sistema estrutural e as paredes interiores.

#### 4.1.2.2 Laje do Piso Térreo

A laje do piso térreo está em contacto com um desvão ventilado. Por essa razão, não está em contacto direto com o terreno, pelo que poderá ser igualmente assumida a estrutura em madeira maciça, reforçada com painéis OSB, e uma camada expressiva de isolamento térmico, para responder aos requisitos térmicos regulamentares adotados ao clima da localização geográfica definida, que é a cidade de Kiruna, na Suécia.

---

Como material para o revestimento do pavimento, foram comparadas as várias opções disponíveis no *BEES* (Figura 4.8). O programa não dispõe de nenhum acabamento para pavimento em madeira natural, o tradicional soalho, que seria uma opção desejável para a solução. No entanto, apresenta dois produtos portugueses, fabricados à base de cortiça natural. Apesar das emissões associadas à longa distância que este produto tem que percorrer para ser transportado para os EUA, a cortiça apresenta um desempenho ambiental excelente, pelo facto de se tratar de um produto natural, renovável e com reduzida transformação até à sua utilização em obra. De uma forma geral, o linóleo também apresenta bom desempenho: em termos ambientais, é um pouco mais prejudicial do que a cortiça, mas compensa em termos económicos, considerando a realidade americana tal como apresentada na base de dados utilizada. No entanto, dado que a cortiça apresenta um bom comportamento térmico, é de esperar que a diferença de custo inicial seja amortizada no período de utilização do edifício, com ganhos na redução do consumo de energia associada à climatização da habitação. Para confirmação desta suposição, o procedimento ideal seria efetuar duas simulações distintas, variando apenas o material de revestimento, para obter o balanço energético e económico ao longo do ciclo de vida do edifício. No entanto, o objectivo desta Avaliação de Ciclo de Vida concentra-se na comparação entre dois sistemas estruturais, pelo que outras simulações serão evitadas.



**Figura 4.8 - Gráfico de desempenho global (ambiental e económico) de vários produtos disponíveis no BEES para acabamento de pavimentos da habitação.**

Entre os dois produtos de cortiça disponíveis, foi selecionado o *Natural Cork Parquet*, uma vez que este apresenta um custo inferior e semelhante desempenho ambiental. O *BEES* considera que este tipo de pavimento é composto por 93% de cortiça reciclada, aglutinada através de um produto à base de uretano, que corresponde aos restantes 7%. Uma vez que se trata de um produto reciclado, proveniente de desperdícios de outras indústrias, não são consideradas as emissões relativas ao

processo de produção e transformação inicial da cortiça. No entanto, é considerado o processo de moagem e transporte da cortiça até à fábrica onde é produzido o pavimento. O cálculo do impacto ambiental deste produto também tem em conta o transporte de Portugal para os EUA, por via marítima, e do porto americano para o armazenista, por via terrestre (camião). Na instalação do produto em obra, utiliza-se cola à base de água, na proporção de 0,009 kg de cola por cada unidade funcional de produto, correspondente a 0,09 m<sup>2</sup> de pavimento pronto. Considera-se que o produto se mantém em serviço durante os 50 anos de vida-útil da casa, sem qualquer tipo de manutenção ou substituição. Terminado esse período, e uma vez que o *BEES* não reconhece ainda processos de reciclagem que valorizem este tipo de resíduo, o seu destino é o aterro sanitário.

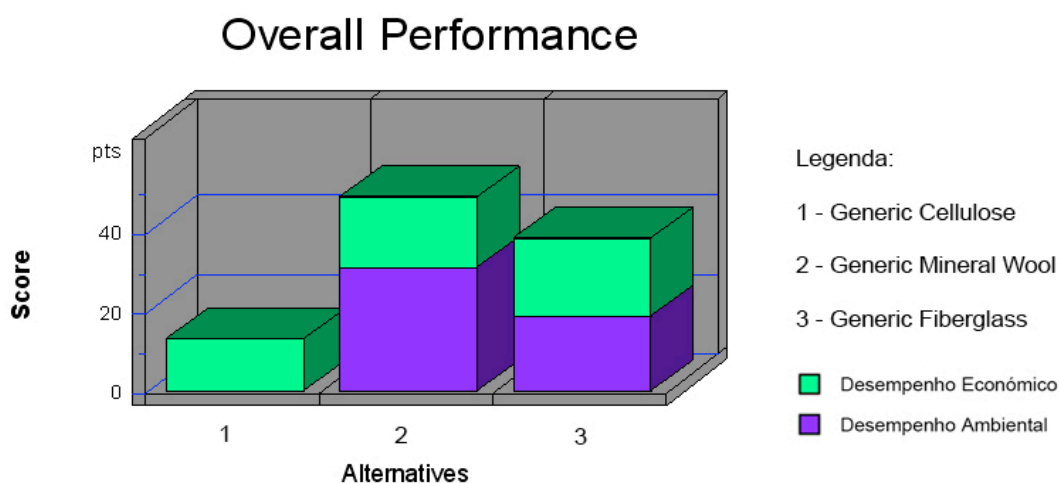


Figura 4.9 - Gráfico de desempenho global (ambiental e económico) de vários produtos disponíveis no BEES para isolamento térmico.

O gráfico da Figura 4.9 serviu de base à seleção do material de isolamento a utilizar no conjunto do edifício. Compara os três produtos mais importantes disponíveis no *BEES* para a função de isolamento térmico: celulose, lã mineral e fibra de vidro. Relativamente aos custos, não existem diferenças significativas entre os três produtos, apesar de a celulose apresentar um custo ligeiramente inferior aos restantes. Já no que respeita ao desempenho ambiental, a diferença entre os três é acentuada, sendo a celulose bastante mais vantajosa. Por essa razão, e uma vez que não apresenta comportamento térmico significativamente pior do que os restantes, será este o material adoptado para isolamento térmico da solução.

O *BEES* considera que este produto é composto por 85% de papel reciclado, proveniente de jornais. Os restantes 15% referem-se ao tratamento ignífugo a que o papel é sujeito, composto por sulfato de amónio, boratos e ácido bórico. A espessura de referência para o isolamento de lajes com celulose é de 27,6 cm. Uma vez que a espessura necessária para cumprimento dos requisitos

térmicos, utilizando isolamento celulósico, é de 40 cm, para efeito de cálculo das emissões associadas ao produto, considerar-se-á uma área de 1,45 vezes a superfície real do piso térreo.

Tal como na cortiça, uma vez que este produto usa como matéria-prima os desperdícios de outras atividades, as emissões relativas à produção inicial do papel não são consideradas. É considerado apenas o transporte da matéria-prima para a unidade de produção do material de isolamento, sendo o transporte da fábrica para o local da obra modelado de acordo com o estabelecido para os restantes produtos: distância de 100 milhas. Todos os desperdícios de material voltam a entrar na cadeia de produção, pelo que se considera que não existem resíduos resultantes do processo de fabrico deste produto.

De acordo com o processo de seleção descrito, a solução final para a laje do piso térreo é a ilustrada na Figura 4.10.

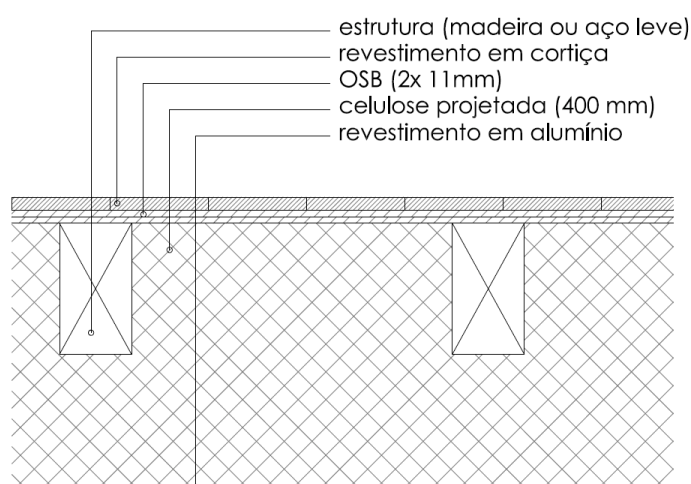


Figura 4.10 - Laje do piso térreo (sem escala)

#### 4.1.2.3 Laje do Primeiro Piso – Em Contacto com o Exterior

Uma parte do primeiro piso da casa situa-se sobre uma zona de estacionamento aberto, estando por isso a laje em contacto com o exterior. Dado que os requisitos são semelhantes aos da laje de pavimento em contacto com desvão ventilado, foi adoptada a mesma solução construtiva revestimento do piso em cortiça, dois painéis de OSB sobre a estrutura de madeira ou aço enformado a frio, preenchimento da caixa de ar com celulose projetada em espessura adequada ao cumprimento dos requisitos térmicos (40 cm), e revestimento da face inferior em alumínio (Figura 4.11).

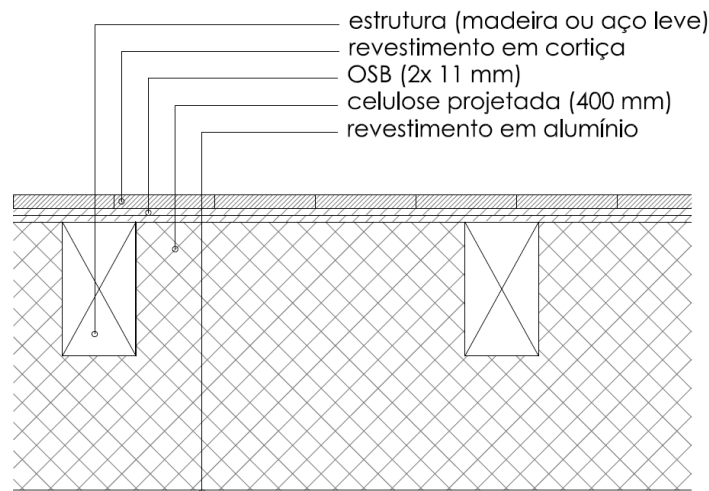


Figura 4.11 - Laje do primeiro piso em contacto com o exterior

#### 4.1.2.4 Laje de Piso Intermédio – Sem Contacto com o Exterior

A laje que divide o primeiro do segundo piso, sem contacto com o exterior, segue o mesmo princípio das anteriores, excepto na espessura de isolamento (que é neste caso inferior à das lajes em contacto com áreas não climatizadas) e ao acabamento da face inferior, que foi neste caso definido como gesso cartonado, uma vez que se trata do tecto do piso térreo.

As placas de gesso cartonado estão modeladas no *BEES* como material para construção de divisórias interiores, mas, para fins de simulação de uma solução realista, e na falta de outro material mais adequado na base de dados disponível, foi aqui considerado como acabamento interior para o tecto.

O *BEES* considera que este material é constituído por uma placa de gesso, coberta nas duas faces com uma camada de papel. Considera ainda os materiais necessários à sua aplicação em obra, nomeadamente: as fitas adesivas para união entre placas de gesso e as massas correntemente utilizadas e os parafusos para fixação das placas de gesso à estrutura de madeira ou à estrutura metálica. Assume-se que a fixação se efetua segundo um espaçamento de 41 cm.

De uma forma geral, este produto é constituído por 85% de gesso, 10% de papel, 3% de aditivos e 2% de gomas. O programa inclui a energia necessária à produção do gesso como matéria-prima e à posterior produção das placas de gesso cartonado. O transporte, até à fábrica, dos vários materiais necessários à produção das placas de gesso também é considerado. Considera-se um desperdício de 2,25% na produção das placas de gesso. Assume-se ainda que 12% dos materiais necessários à aplicação das placas de gesso em obra são desperdiçados, sendo o seu destino final a deposição em aterro.

O tempo de vida útil definido para este material é de 75 anos, sem qualquer operação de manutenção ou substituição. Decorridos os 75 anos, considera-se que o material é depositado em aterro.

A figura 4.12 esquematiza a composição adoptada para a laje de divisão interior entre os dois pisos da habitação.

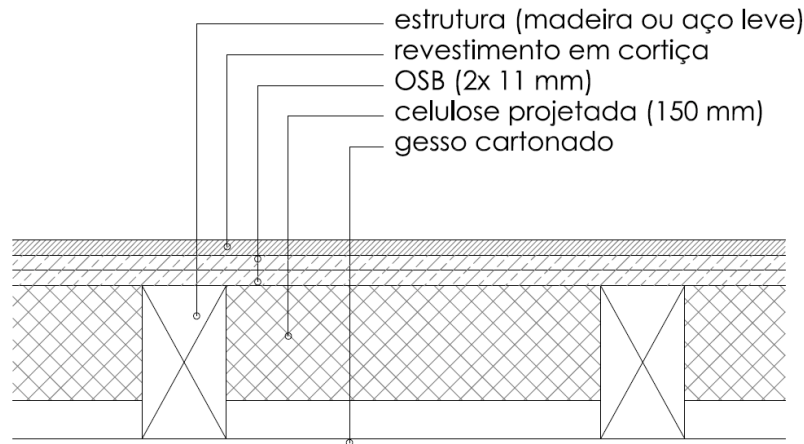


Figura 4.12 - Laje de divisão entre o piso térreo e o primeiro piso (sem escala)

#### 4.1.2.5 Cobertura

A cobertura segue o mesmo princípio dos restantes elementos construtivos já descritos. Trata-se de um tipo de cobertura não acessível, que se imagina não ser de uso muito corrente nos EUA, dado que não existem materiais adequados na base de dados do *BEES* para este fim. Os materiais disponíveis no *BEES* favorecem apenas a utilização de coberturas com inclinação acentuada.

No entanto, procurou adoptar-se aqueles que mais se assemelham à composição genérica de uma cobertura plana. Como material para acabamento da face exterior da laje, foi seleccionado *Generic Asphalt Shingles* que apresenta menores impactos ambientais, quando comparado com o *Generic Fiber Cement Shingles*, de função semelhante.

Estas telhas são produzidas a partir de uma base de fibra de vidro, que é posteriormente impregnada e revestida com uma mistura de asfalto e *filler* mineral. O *BEES* considera como unidade funcional uma área de 9,29 m<sup>2</sup> que, considerando a necessária sobreposição entre telhas, corresponde a 80 unidades. Na instalação de cada telha, o *BEES* considera a necessidade de utilização de 4 pregos de fixação próprios para cobertura, com acabamento galvanizado. Considera ainda a necessidade de utilização de uma camada de feltro sob as telhas, incluindo os pregos necessários à sua fixação. A instalação deste produto é exclusivamente manual, pelo que não foi

---

considerada nenhuma necessidade energética associada à fase de colocação em obra. É considerada uma média de desperdício de 10% do material em fase de obra, que acaba por ser depositado em aterro. A durabilidade considerada pelo *BEES* para este material é de 20 anos, pelo que, para um período de 50 anos, será necessário renovar o material duas vezes. Por essa razão, a área necessária deste material é multiplicada por 3: a aplicação inicial, e duas renovações posteriores, no 20º e 40º ano de utilização.

A solução de cobertura plana deverá ser reforçada por uma membrana impermeabilizante. Para isso, seleccionou-se o material que mais se adequa a este fim, o *Prime Coatings Utilithane*. Trata-se de um produto aplicado em spray, com uma espessura média de 2,54 mm. A unidade funcional adoptada pelo programa é de 9 cm<sup>2</sup>. O fabricante deste produto não fornece informações detalhadas sobre as matérias-primas e processos envolvidos no fabrico do seu produto, pelo que algumas emissões poderão não ser consideradas. O período de vida-útil do material é de 50 anos, sendo o cenário de fim-de-vida definido como “deposição em aterro”. No entanto, e uma vez que está a ser considerada a substituição das telhas de asfalto (duas vezes ao longo do período de utilização do edifício), assume-se também a reposição desta membrana, pelo que a sua quantidade é também considerada três vezes.

Relativamente ao isolamento térmico da cobertura, a sua espessura ascende aos 41 cm. A composição final da laje é apresentada na Figura 4.13.

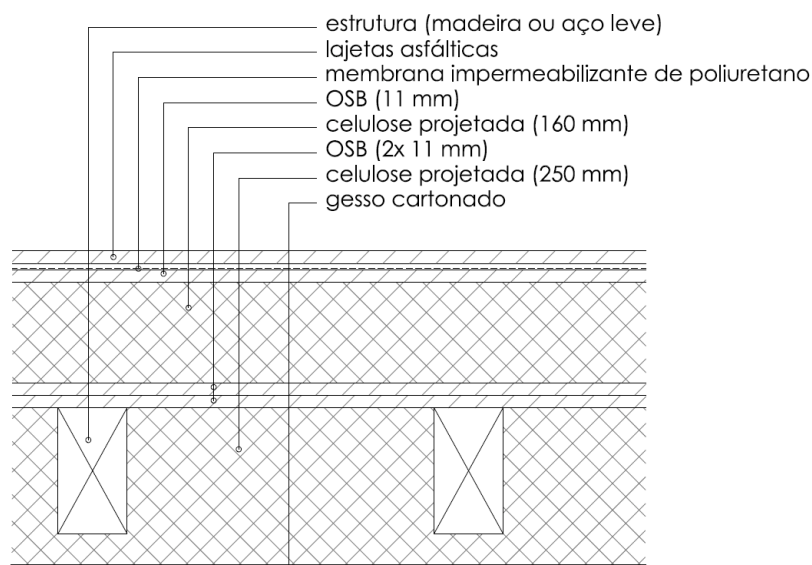


Figura 4.13 - Laje de cobertura não-acessível (sem escala).



#### 4.1.2.6 Terraço

No primeiro piso da habitação, existe uma área de 20,16 m<sup>2</sup> definida como cobertura em terraço. Para este caso, foi seguido o mesmo princípio dos restantes elementos construtivos, à exceção do revestimento do piso, que se entendeu que deveria ser em madeira, por razões de coerência com o aspecto exterior da casa.

A base de dados do *BEES* não oferece nenhum material específico para pavimentos exteriores em madeira. Considerou-se que o material que mais se aproxima do pretendido é o *Cedar Siding*.

O *BEES* define o acabamento genérico exterior em madeira de cedro, atribuindo ao material características de baixo peso, baixa densidade, qualidade estética e adequada resistência às condições climáticas. O ciclo de vida considerado no cálculo dos impactos deste produto inclui o abate da árvore e o seu transporte para a serração, onde a madeira é sujeita a um processo de lavagem, limpeza e corte em pranchas, que são posteriormente aparadas e secas. Após a secagem, as pranchas de madeira são novamente aparadas e dimensionadas de acordo com as dimensões comerciais definidas para o produto. A espessura standard para as ripas de madeira é de 1,3 cm, sendo o seu comprimento de 15 cm. O programa considera que o revestimento é fixo através de peças em aço galvanizado de 41 cm. O acabamento da madeira faz-se através de uma camada de primário e duas de verniz. O plano de manutenção definido para este material consiste na reaplicação da camada de verniz de 10 em 10 anos, que está já incorporado no valor final apresentado pelo *BEES*. O consumo de energia para produção do material inclui a energia eléctrica necessária para o funcionamento das estufas onde se desenvolvem as árvores jovens a partir de sementes, o gasóleo utilizado nas máquinas de abate das árvores, assim como uma pequena quantidade de fertilizante. A densidade média considerada para a madeira após secagem, é de 509,77 kg/m<sup>3</sup>. O programa considera ainda que as árvores absorvem dióxido de carbono durante o seu crescimento, sendo este uma parte constituinte dos tecidos da madeira. O valor estimado para a fixação de dióxido de carbono é de 1,84 kg de CO<sub>2</sub> por kg de madeira seca em estufa, e antes de ser processada como produto para construção. Neste sentido, e uma vez que a fixação de CO<sub>2</sub> pela madeira corresponde igualmente à libertação de oxigénio para a atmosfera, este material consegue assim um “saldo positivo” no que respeita às emissões de gases poluentes, que atenua as emissões associadas aos processos de abate, transporte e transformação dos produtos de madeira.

Os restantes materiais repetem a solução já descrita para o elemento “Cobertura”, de acordo com o representado na Figura 4.14.

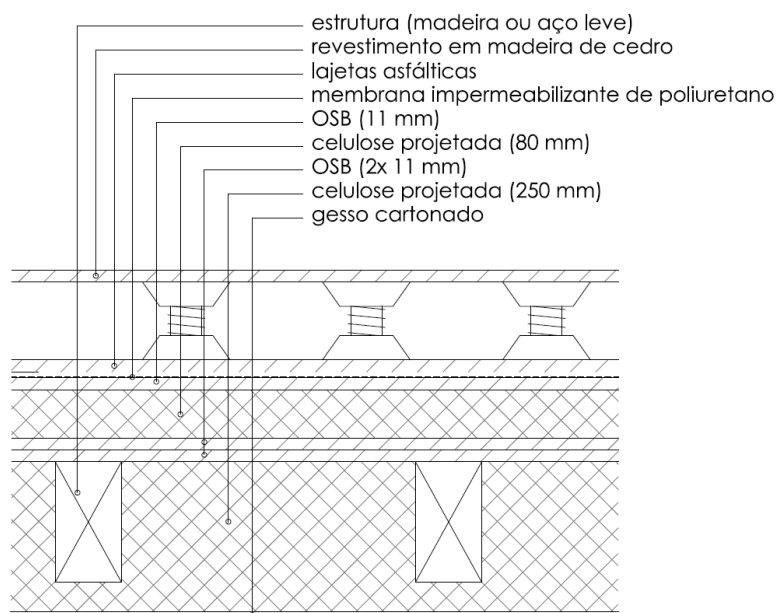


Figura 4.14 - Laje de cobertura em terraço (sem escala)

#### 4.1.2.7 Paredes Exteriores

Nesta primeira solução para o edifício de habitação unifamiliar com estrutura em madeira, optou-se pela definição do acabamento exterior das fachadas com ripado de madeira de cedro, o reforço da impermeabilização com uma membrana de poliuretano aplicada em spray, dois painéis de OSB fixos em ambas as faces da estrutura de madeira, de forma a completarem o paramento vertical, e acabamento em gesso cartonado pelo interior. O espaçamento entre os painéis OSB e a estrutura de madeira é preenchido com lã mineral para isolamento térmico, sendo este complementado por uma outra camada de lã mineral aplicada pelo interior, entre o gesso cartonado e o painel OSB, conforme representado na Figura 4.15.

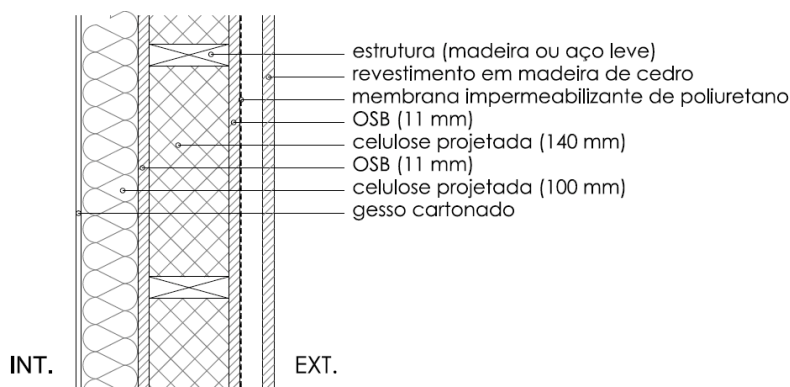


Figura 4.15 - Esquema representativo da solução construtiva adoptada para as paredes exteriores (sem escala).

A membrana de impermeabilização em poliuretano disponível no programa utilizado é definida para aplicação em coberturas. No entanto, visto que o sistema construtivo adoptado carece de uma membrana impermeabilizante que reforce a resistência à ação da água do revestimento em madeira de cedro, e que o programa não oferece uma alternativa específica para este fim, adoptamos esta membrana como material de impermeabilização das paredes exteriores. Esta membrana é aplicada através de spray, perfazendo uma espessura média de 2,54 mm. Os fluxos assumidos pelo *BEES*, assim como as matérias primas, são considerados confidenciais pelo fabricante, sendo apenas contabilizadas as emissões correspondentes à energia consumida durante o processo de fabrico do material. O transporte dos dois componentes da membrana (resina e ativador) da fábrica para o local da obra é assumido como sendo realizado em camiões cujo combustível é gasóleo, percorrendo uma distância de 1287 km.

#### 4.1.2.8 Paredes Interiores

O *BEES* oferece cinco diferentes alternativas para o acabamento das paredes interiores: *Generic Gypsum Board*, *Trespa Virtuon Panels*, *Trespa Athlon Panels*, *P&M Plastics Altree Panels* e *Anonymous Biobased Panel Product*.

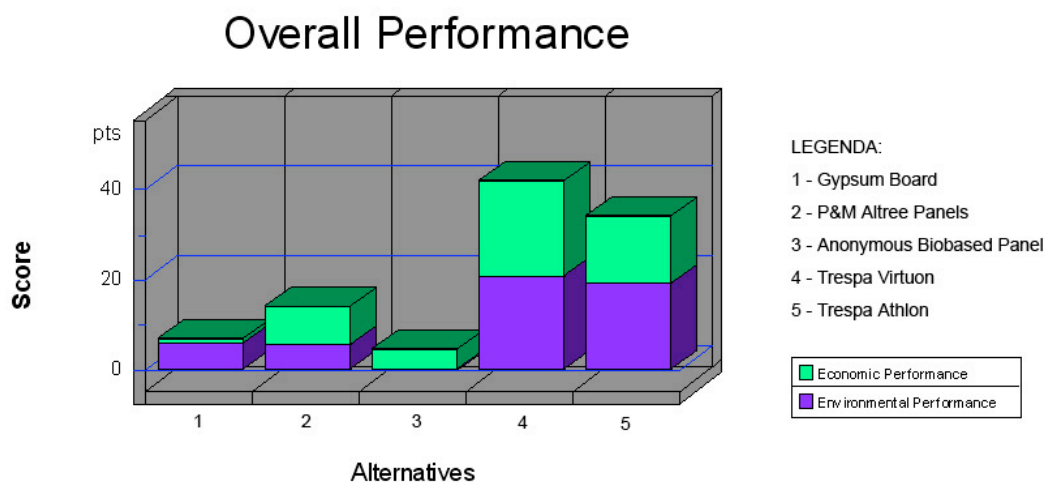


Figura 4.16 - Gráfico de desempenho global (ambiental e económico) de vários produtos disponíveis no BEES para compartimentação interior.

O produto que apresenta o melhor desempenho global, de acordo com a avaliação sumária e expedita oferecida pelo programa, é o *Anonymous Biobased Panel*, especialmente no que respeita ao desempenho ambiental. No entanto, o fabricante deste produto não permitiu a divulgação de quaisquer informações sobre os processos e materiais associados, o que inviabiliza a seleção deste

produto para a solução construtiva. Em termos globais, o “segundo classificado” neste ranking é o *Gypsum Board* que, embora apresente um desempenho ambiental inferior ao do *P&M Altree Panels*, é vantajoso a nível de custos, pelo que parece ser, de modo global, a melhor opção. Os aspectos assumidos pelo *BEES* para caracterização deste material estão já referidos no ponto em que se caracteriza a solução adoptada para a construção da laje de piso intermédio.

Consideramos que este produto carece ainda de estrutura, pelo que comparamos entre os três tipos possíveis, de acordo com o gráfico seguinte.

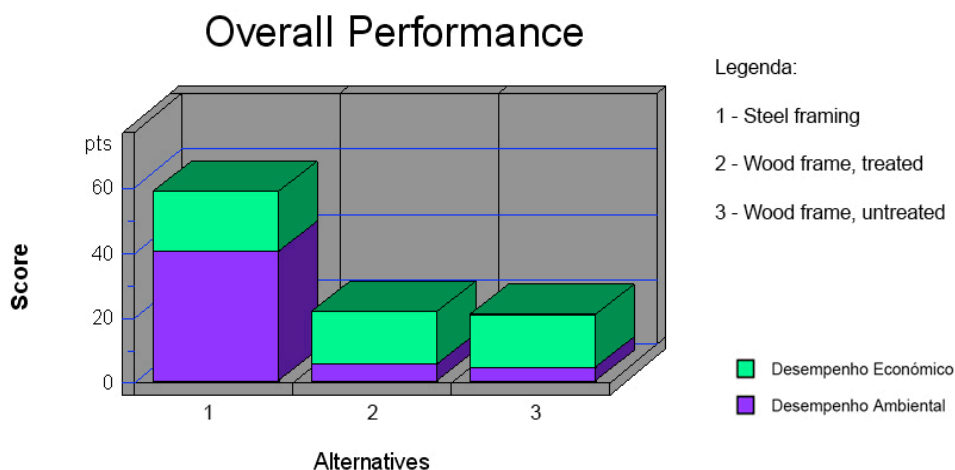


Figura 4.17 - Gráfico de desempenho global (ambiental e económico) de vários produtos disponíveis no BEES para fins estruturais.

Uma vez que as duas opções de estrutura de madeira, tratada e não-tratada, apresentam desempenho global muito semelhante, optamos pela solução tratada dado que esta terá provavelmente uma durabilidade superior ao longo dos 50 anos de vida útil esperada para a habitação.

A caixa-de-ar existente entre as duas placas de gesso cartonado, cujo distanciamento corresponde à largura dos elementos de madeira que compõem a estrutura, foi preenchida com o material adoptado nesta solução para isolamento térmico, à base de celulose.

Desta forma, a solução para as paredes interiores resume-se no esquema da Figura 4.18.

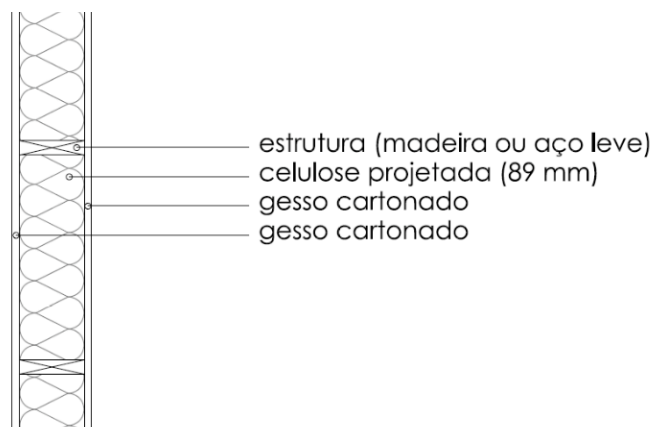


Figura 4.18 - Esquema da solução construtiva adoptada para as paredes interiores (sem escala)

### 4.1.3 Desempenho Ambiental da Solução

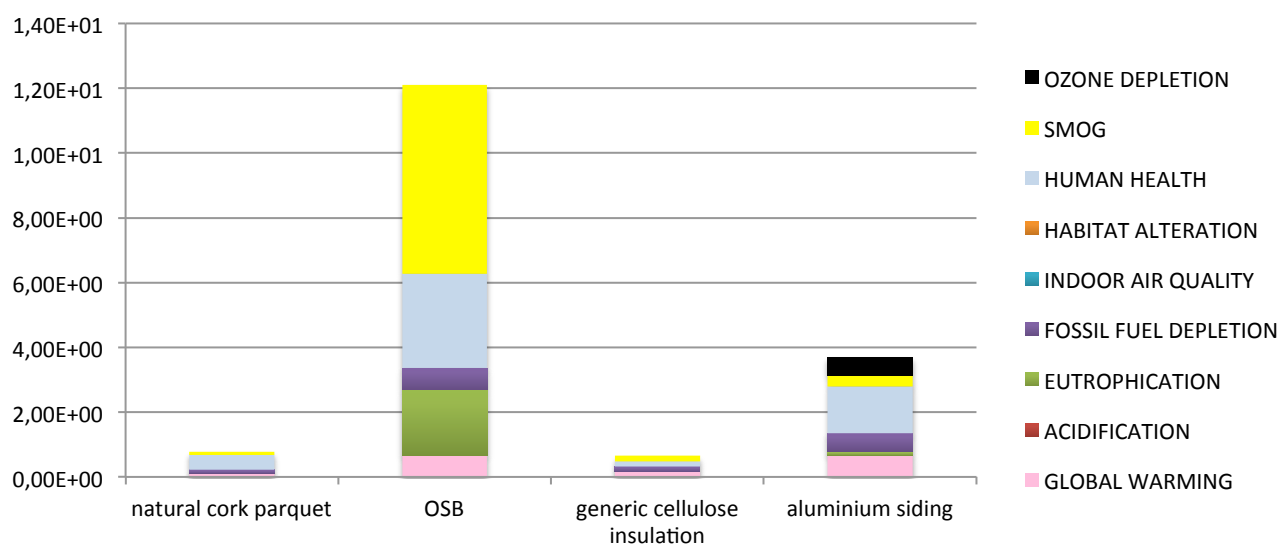
O software utilizado para quantificação dos impactos ambientais destina-se a apoiar a seleção entre vários materiais. Os valores que a base de dados fornece para as emissões relativas a cada um dos materiais foram agregados, para cálculo dos impactos relativos ao conjunto do edifício.

A Tabela 4.11 sintetiza os valores para cada uma das categorias de impacto, relativamente à laje do piso térreo.

**Tabela 4.11 – Quantificação dos Impactos ambientais da laje do piso térreo**

Piso Térreo (m2)		100,8									
CATEGORIA DE IMPACTO	Peso	Natural Cork Parquet (m2)		OSB 2x (m2)		Generic Cellulose Insulation x 1,45(m2)		Aluminium Siding (m2)		TOTAL	
	%	0,09	100,80	0,09	201,6	0,09	146,16	0,09	100,8		
GLOBAL WARMING	11,0	1,00E-04	1,12E-01	3,00E-04	6,72E-01	1,00E-04	1,62E-01	6,00E-04	6,72E-01	1,62E+00	
ACIDIFICATION	11,0	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	
EUTROPHICATION	11,0	0,00E+00	0,00E+00	9,00E-04	2,02E+00	0,00E+00	0,00E+00	1,00E-04	1,12E-01	2,13E+00	
FOSSIL FUEL DEPLETION	11,0	1,00E-04	1,12E-01	3,00E-04	6,72E-01	1,00E-04	1,62E-01	5,00E-04	5,60E-01	1,51E+00	
INDOOR AIR QUALITY	11,0	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	
HABITAT ALTERATION	11,0	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	
HUMAN HEALTH	12,0	4,00E-04	4,48E-01	1,30E-03	2,91E+00	1,00E-04	1,62E-01	1,30E-03	1,46E+00	4,98E+00	
SMOG	11,0	1,00E-04	1,12E-01	2,60E-03	5,82E+00	1,00E-04	1,62E-01	3,00E-04	3,36E-01	6,43E+00	
OZONE DEPLETION	11,0	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	5,00E-04	5,60E-01	5,60E-01	
<b>TOTAL</b>	<b>100</b>	<b>7,00E-04</b>	<b>7,84E-01</b>	<b>5,40E-03</b>	<b>1,21E+01</b>	<b>4,00E-04</b>	<b>6,50E-01</b>	<b>3,30E-03</b>	<b>3,70E+00</b>	<b>1,72E+01</b>	

A tradução dos valores sob a forma gráfica (Figura 4.19) permite detectar quais os materiais responsáveis pela maior percentagem dos impactos associados a este elemento construtivo. O produto que representa os impactos mais relevantes corresponde aos painéis de OSB, ao que se segue o revestimento de alumínio.



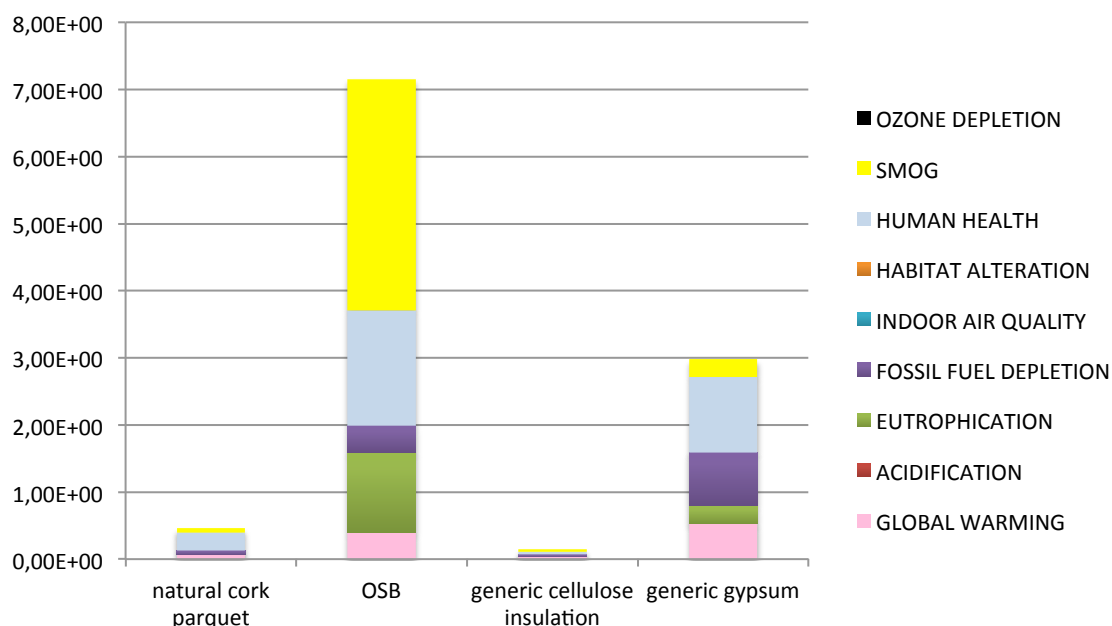
**Figura 4.19 - Gráfico representativo dos impactos associados aos materiais incluídos na laje do piso térreo.**

A Tabela 4.12 indica os valores para cada categoria de impacto, relativamente aos materiais utilizados na laje que separa o piso térreo do primeiro piso da habitação, o chamado “piso intermédio”.

**Tabela 4.12 - Quantificação dos impactos associados com os materiais incluídos na laje de separação interior dos dois pisos da habitação**

Piso Intermédio (m2)		9,58									
CATEGORIAS DE IMPACTO		Natural Cork Parquet (m2)		OSB 2x (m2)		Generic Cellulose Insulation x 0,54 (m2)		Generic Gypsum		TOTAL	
	%	0,09	59,58	0,09	119,16	0,09	32,17	0,09	59,58		
GLOBAL WARMING	11,0	1,00E-04	6,62E-02	3,00E-04	3,97E-01	0,00E+00	0,00E+00	8,00E-04	5,30E-01	9,93E-01	
ACIDIFICATION	11,0	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	
EUTROPHICATION	11,0	0,00E+00	0,00E+00	9,00E-04	1,19E+00	0,00E+00	0,00E+00	4,00E-04	2,65E-01	1,46E+00	
FOSSIL FUEL DEPLETION	11,0	1,00E-04	6,62E-02	3,00E-04	3,97E-01	0,00E+00	0,00E+00	1,20E-03	7,94E-01	1,26E+00	
INDOOR AIR QUALITY	11,0	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	
HABITAT ALTERATION	11,0	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	
HUMAN HEALTH	12,0	4,00E-04	2,65E-01	1,30E-03	1,72E+00	0,00E+00	0,00E+00	1,70E-03	1,13E+00	3,11E+00	
SMOG	11,0	1,00E-04	6,62E-02	2,60E-03	3,44E+00	0,00E+00	0,00E+00	4,00E-04	2,65E-01	3,77E+00	
OZONE DEPLETION	11,0	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	
TOTAL	100	7,00E-04	4,63E-01	5,40E-03	7,15E+00	0,00E+00	0,00E+00	4,50E-03	2,98E+00	1,06E+01	

No que respeita a este elemento construtivo, o material que representa a maior fracção dos impactos ambientais é o OSB. As placas de gesso representam também uma percentagem significativa de impactos, tal como representado na Figura 4.20.



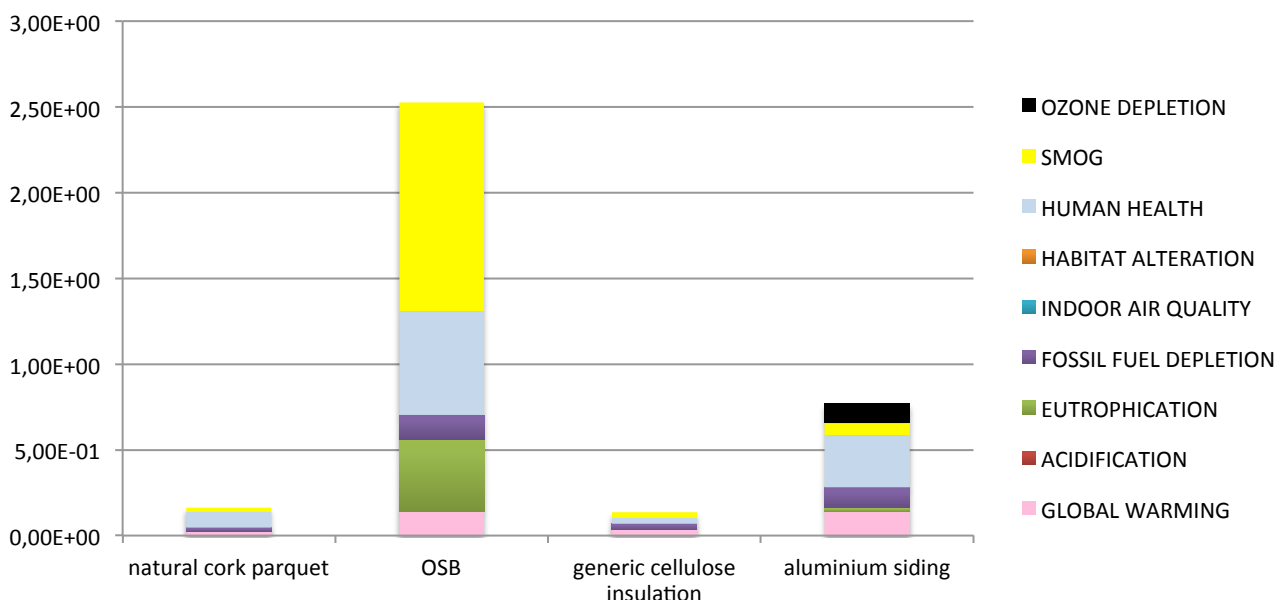
**Figura 4.20 - Gráfico Representativo dos Impactos Ambientais associados aos materiais incluídos na laje de separação interior entre os dois pisos da habitação.**

Os impactos associados com a porção de laje do primeiro piso que se encontra em contacto com o exterior (na sua face inferior), correspondente a uma área de 21,06 m<sup>2</sup>, estão representados na Tabela 4.13.

**Tabela 4.13 - Quantificação dos Impactos Ambientais associados aos materiais incluídos na laje de separação entre o piso 1 (interior) e o piso 0 (exterior)**

Laje Contacto Ext (m2)		21,06									
CATEGORIAS DE IMPACTO		Natural Cork Parquet (m2)		OSB 2x (m2)		Generic Cellulose Insulation x 1,45 (m2)		aluminium siding (m2)		TOTAL	
	%	0,09	21,06	0,09	42,12	0,09	30,54	0,09	21,06		
GLOBAL WARMING	11,0	1,00E-04	2,34E-02	3,00E-04	1,40E-01	1,00E-04	3,39E-02	6,00E-04	1,40E-01	3,38E-01	
ACIDIFICATION	11,0	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	
EUTROPHICATION	11,0	0,00E+00	0,00E+00	9,00E-04	4,21E-01	0,00E+00	0,00E+00	1,00E-04	2,34E-02	4,45E-01	
FOSSIL FUEL DEPLETION	11,0	1,00E-04	2,34E-02	3,00E-04	1,40E-01	1,00E-04	3,39E-02	5,00E-04	1,17E-01	3,15E-01	
INDOOR AIR QUALITY	11,0	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	
HABITAT ALTERATION	11,0	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	
HUMAN HEALTH	12,0	4,00E-04	9,36E-02	1,30E-03	6,08E-01	1,00E-04	3,39E-02	1,30E-03	3,04E-01	1,04E+00	
SMOG	11,0	1,00E-04	2,34E-02	2,60E-03	1,22E+00	1,00E-04	3,39E-02	3,00E-04	7,02E-02	1,34E+00	
OZONE DEPLETION	11,0	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	5,00E-04	1,17E-01	1,17E-01	
TOTAL	100	7,00E-04	1,64E-01	5,40E-03	2,53E+00	4,00E-04	1,36E-01	3,30E-03	7,72E-01	3,60E+00	

Da observação da Fig. 4.21, que traduz a tabela 4.13 de forma gráfica, associando cada material construtivo aos respectivos impactos ambientais, pode concluir-se que aquele que representa os maiores impactos relativos é o OSB, seguido do revestimento de alumínio. No conjunto da laje em análise, o revestimento do pavimento em cortiça, assim como o isolamento à base de celulose, representam um volume de impactos muito reduzido.



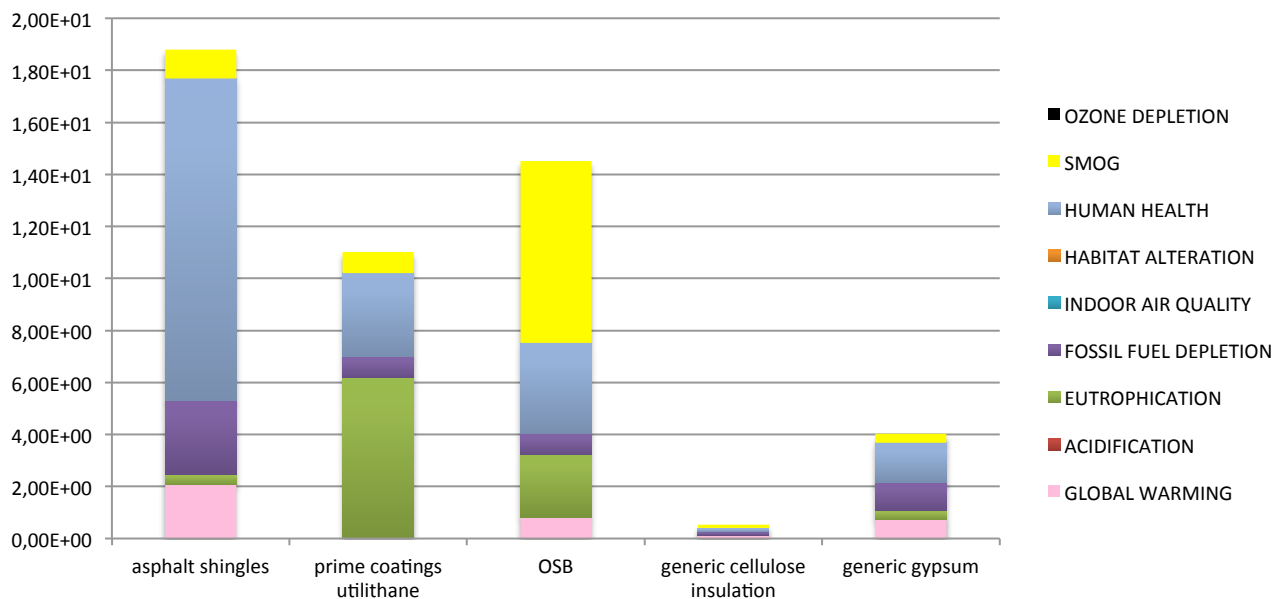
**Figura 4.21 - Gráfico representativo do conjunto dos Impactos Ambientais associados aos materiais presentes na laje do piso 1 (interior) em contacto com o exterior no piso 0.**

A área de cobertura não-visitável, que é de 80,64 m<sup>2</sup>, pode representar-se através da lista de materiais e respectivos impactos ambientais representados na Tabela 4.14.

**Tabela 4.14 - Quantificação dos Impactos Ambientais associados aos materiais incluídos na laje de cobertura (não-visitável)**

Cobertura (m2)		80,64										TOTAL
CATEGORIAS DE IMPACTO	%	asphalt shingles (m2) 3x em 50 anos		prime coatings utilithane (m2) 3x em 50 anos		OSB 3x (m2)		generic cellulose insulation x 1,49(m2)		generic gypsum		
		9,29	241,92	0,09	241,92	0,09	241,92	0,09	120,1536	0,09	80,64	
GLOBAL WARMING	11,0	7,92E-02	2,06E+00	0,00E+00	0,00E+00	3,00E-04	8,06E-01	1,00E-04	1,34E-01	8,00E-04	7,17E-01	3,72E+00
ACIDIFICATION	11,0	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
EUTROPHICATION	11,0	1,57E-02	4,09E-01	2,30E-03	6,18E+00	9,00E-04	2,42E+00	0,00E+00	0,00E+00	4,00E-04	3,58E-01	9,37E+00
FOSSIL FUEL DEPLETION	11,0	1,09E-01	2,85E+00	3,00E-04	8,06E-01	3,00E-04	8,06E-01	1,00E-04	1,34E-01	1,20E-03	1,08E+00	5,67E+00
INDOOR AIR QUALITY	11,0	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
HABITAT ALTERATION	11,0	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
HUMAN HEALTH	12,0	4,75E-01	1,24E+01	1,20E-03	3,23E+00	1,30E-03	3,49E+00	1,00E-04	1,34E-01	1,70E-03	1,52E+00	2,07E+01
SMOG	11,0	4,26E-02	1,11E+00	3,00E-04	8,06E-01	2,60E-03	6,99E+00	1,00E-04	1,34E-01	4,00E-04	3,58E-01	9,40E+00
OZONE DEPLETION	11,0	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
TOTAL	100	7,22E-01	1,88E+01	4,10E-03	1,10E+01	5,40E-03	1,45E+01	4,00E-04	5,34E-01	4,50E-03	4,03E+00	4,89E+01

A informação gráfica mostra claramente o peso das telhas asfálticas no conjunto dos impactos ambientais da cobertura (Figura 4.22). Os painéis de OSB continuam a representar uma significativa proporção da totalidade dos impactos, logo seguidos pela membrana de impermeabilização.



**Figura 4.22 - Gráfico representativo do conjunto dos Impactos Ambientais associados aos materiais constituintes da laje de cobertura não-visitável.**

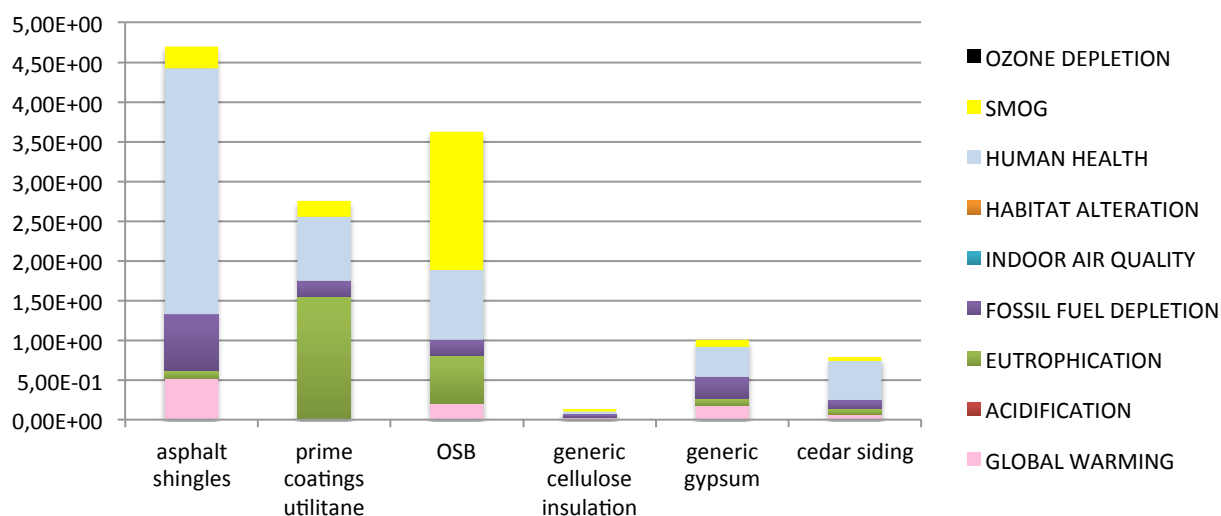
A zona de cobertura visitável, ou terraço, que corresponde a uma área de 20,16 m<sup>2</sup>, representa os seguintes impactos ambientais, representados nos vários materiais que se consideraram na constituição deste elemento, de acordo com a Tabela 4.15.



**Tabela 4.15 - Quantificação dos Impactos Ambientais relacionados com os materiais incluídos na laje de terraço da habitação**

Terraço (m2) 20,16														
CATEGORIAS DE IMPACTO	%	asphalt shingles (m2) 3x em 50 anos		prime coatings utilitane (m2) 3x em 50 anos		OSB 3x (m2)		generic cellulose insulation x 1,49(m2)		generic gypsum		cedar siding		TOTAL
		9,29	60,48	0,09	60,48	0,09	60,48	0,09	30,0384	0,09	20,16	0,09	20,16	
GLOBAL WARMING	11,0	7,92E-02	5,16E-01	0,00E+00	0,00E+00	3,00E-04	2,02E-01	1,00E-04	3,34E-02	8,00E-04	1,79E-01	3,00E-04	6,72E-02	9,30E-01
ACIDIFICATION	11,0	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
EUTROPHICATION	11,0	1,57E-02	1,02E-01	2,30E-03	1,55E+00	9,00E-04	6,05E-01	0,00E+00	0,00E+00	4,00E-04	8,96E-02	3,00E-04	6,72E-02	2,34E+00
FOSSIL FUEL DEPLETION	11,0	1,09E-01	7,12E-01	3,00E-04	2,02E-01	3,00E-04	2,02E-01	1,00E-04	3,34E-02	1,20E-03	2,69E-01	5,00E-04	1,12E-01	1,42E+00
INDOOR AIR QUALITY	11,0	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
HABITAT ALTERATION	11,0	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
HUMAN HEALTH	12,0	4,75E-01	3,09E+00	1,20E-03	8,06E-01	1,30E-03	8,74E-01	1,00E-04	3,34E-02	1,70E-03	3,81E-01	2,20E-03	4,93E-01	5,19E+00
SMOG	11,0	4,26E-02	2,77E-01	3,00E-04	2,02E-01	2,60E-03	1,75E+00	1,00E-04	3,34E-02	4,00E-04	8,96E-02	2,00E-04	4,48E-02	2,35E+00
OZONE DEPLETION	11,0	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
TOTAL	100	7,22E-01	4,70E+00	4,10E-03	2,76E+00	5,40E-03	3,63E+00	4,00E-04	1,34E-01	4,50E-03	1,01E+00	3,50E-03	7,84E-01	1,22E+01

O gráfico da Figura 4.23 permite observar um padrão semelhante ao resultante da análise da cobertura não-visitável, com elevada proporção de impactos associada às telhas asfálticas, membrana impermeabilizante e OSB. O único material em que este elemento difere é o revestimento do pavimento em madeira de cedro, que representa um volume de impactos relativamente reduzido.



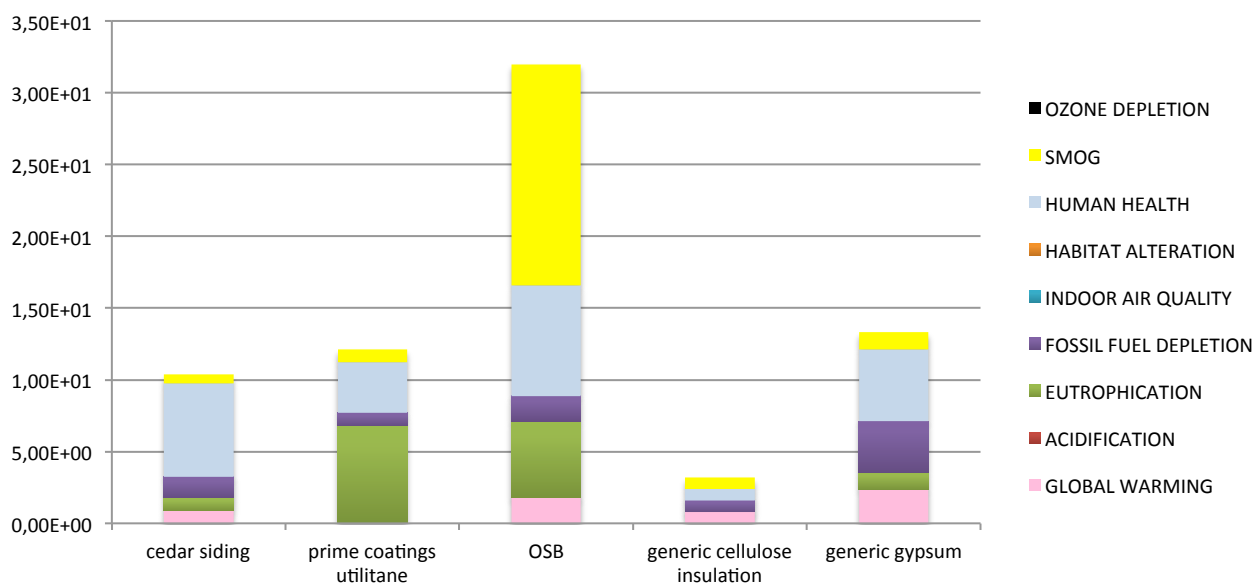
**Figura 4.23 - Gráfico representativo do conjunto dos Impactos Ambientais relacionados com os materiais constituintes da laje do terraço da habitação.**

Relativamente às paredes exteriores, os resultados relativos às categorias de impacto ambiental são apresentados na Tabela 4.16.

**Tabela 4.16 - Quantificação dos Impactos Ambientais associados aos materiais incluídos nas paredes exteriores da habitação**

Paredes Exteriores 266,4												
CATEGORIAS DE IMPACTO		Cedar Siding		Prime Coatings Utilitane (m2)		OSB 2x (m2)		Generic Cellulose Insulation x 2,70 (m2)		Generic Gypsum		TOTAL
	%	0,09	266,4	0,09	266,4	0,09	532,8	0,09	719,28	0,09	266,4	
GLOBAL WARMING	11,0	3,00E-04	8,88E-01	0,00E+00	0,00E+00	3,00E-04	1,78E+00	1,00E-04	7,99E-01	8,00E-04	2,37E+00	5,83E+00
ACIDIFICATION	11,0	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
EUTROPHICATION	11,0	3,00E-04	8,88E-01	2,30E-03	6,81E+00	9,00E-04	5,33E+00	0,00E+00	0,00E+00	4,00E-04	1,18E+00	1,42E+01
FOSSIL FUEL DEPLETION	11,0	5,00E-04	1,48E+00	3,00E-04	8,88E-01	3,00E-04	1,78E+00	1,00E-04	7,99E-01	1,20E-03	3,55E+00	8,50E+00
INDOOR AIR QUALITY	11,0	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
HABITAT ALTERATION	11,0	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
HUMAN HEALTH	12,0	2,20E-03	6,51E+00	1,20E-03	3,55E+00	1,30E-03	7,70E+00	1,00E-04	7,99E-01	1,70E-03	5,03E+00	2,36E+01
SMOG	11,0	2,00E-04	5,92E-01	3,00E-04	8,88E-01	2,60E-03	1,54E+01	1,00E-04	7,99E-01	4,00E-04	1,18E+00	1,89E+01
OZONE DEPLETION	11,0	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
<b>TOTAL</b>	<b>100</b>	<b>3,50E-03</b>	<b>1,04E+01</b>	<b>4,10E-03</b>	<b>1,21E+01</b>	<b>5,40E-03</b>	<b>3,20E+01</b>	<b>4,00E-04</b>	<b>3,20E+00</b>	<b>4,50E-03</b>	<b>1,33E+01</b>	<b>7,10E+01</b>

Mais uma vez, e de acordo com a Figura 4.24, observa-se que o material responsável pela maior percentagem dos impactos neste elemento construtivo, corresponde aos painéis OSB.



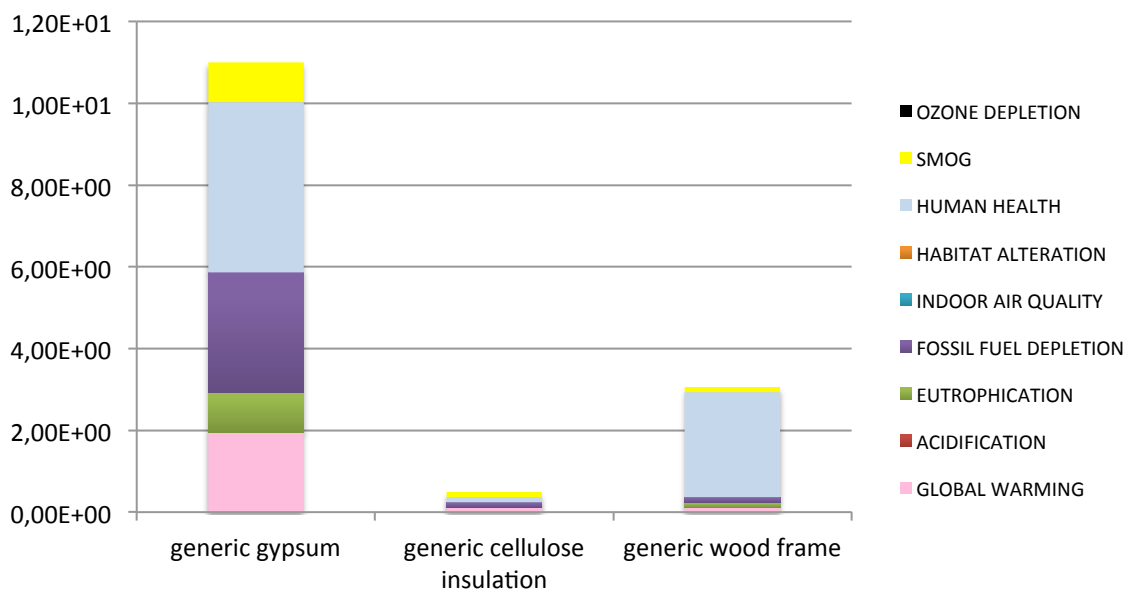
**Figura 4.24 - Gráfico representativo dos Impactos Ambientais associados aos materiais incluídos nas paredes exteriores da habitação.**

As paredes interiores, com estrutura em madeira, acabamento de ambos os lados em painéis de gesso, e preenchimento da caixa-de-ar entre os elementos estruturais com isolamento celulósico, representa os impactos ambientais são quantificados na Tabela 4.17.

**Tabela 4.17 - Quantificação dos Impactos Ambientais associados aos materiais incluídos nas paredes interiores da habitação**

Paredes Interiores (m2)		110							
CATEGORIAS DE IMPACTO		Generic Gypsum		Generic Cellulose Insulation (m2)		Generic Wood Frame, Treated(m2)		TOTAL	
	%	0,09	220	0,09	110	0,09	110		
GLOBAL WARMING	11,0	8,00E-04	1,96E+00	1,00E-04	1,22E-01	1,00E-04	1,22E-01	2,20E+00	
ACIDIFICATION	11,0	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	
EUTROPHICATION	11,0	4,00E-04	9,78E-01	0,00E+00	0,00E+00	1,00E-04	1,22E-01	1,10E+00	
FOSSIL FUEL DEPLETION	11,0	1,20E-03	2,93E+00	1,00E-04	1,22E-01	1,00E-04	1,22E-01	3,18E+00	
INDOOR AIR QUALITY	11,0	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	
HABITAT ALTERATION	11,0	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	
HUMAN HEALTH	12,0	1,70E-03	4,16E+00	1,00E-04	1,22E-01	2,10E-03	2,57E+00	6,84E+00	
SMOG	11,0	4,00E-04	9,78E-01	1,00E-04	1,22E-01	1,00E-04	1,22E-01	1,22E+00	
OZONE DEPLETION	11,0	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	
TOTAL	100	4,50E-03	1,10E+01	4,00E-04	4,89E-01	2,50E-03	3,06E+00	1,45E+01	

Neste caso, e de acordo com a Figura 4.25, o material que representa os maiores impactos corresponde aos painéis de gesso. O material de isolamento, tal como é padrão nos restantes elementos construtivos analisados, representa uma fracção muito reduzida dos impactos globais.



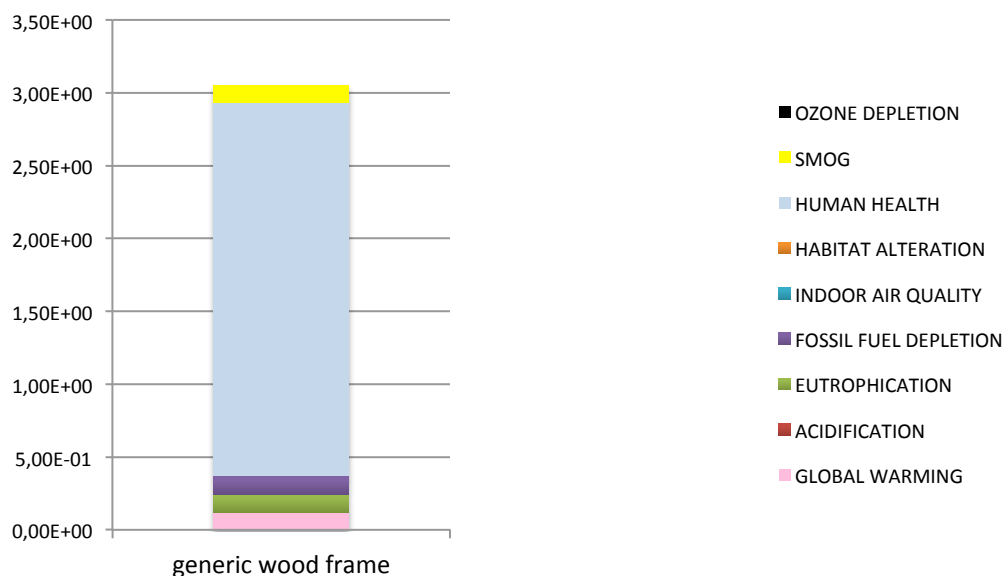
**Figura 4.25 - Gráfico representativo dos Impactos Ambientais associados aos materiais incluídos nas paredes interiores da habitação.**

Por fim, no que respeita à estrutura em madeira, os resultados são apresentados no na Tabela 4.18.

**Tabela 4.18 - Quantificação dos Impactos Ambientais associados à estrutura de madeira da habitação**

Framing (m2)		560		TOTAL
CATEGORIAS DE IMPACTO		Generic Wood Frame, Treated(m2)		
	%	0,09	110	
GLOBAL WARMING	11,0	1,00E-04	1,22E-01	1,22E-01
ACIDIFICATION	11,0	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
EUTROPHICATION	11,0	1,00E-04	1,22E-01	1,22E-01
FOSSIL FUEL DEPLETION	11,0	1,00E-04	1,22E-01	1,22E-01
INDOOR AIR QUALITY	11,0	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
HABITAT ALTERATION	11,0	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
HUMAN HEALTH	12,0	2,10E-03	2,57E+00	2,57E+00
SMOG	11,0	1,00E-04	1,22E-01	1,22E-01
OZONE DEPLETION	11,0	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
TOTAL	100	2,50E-03	3,06E+00	3,06E+00

A maior percentagem dos impactos, tal como se pode observar na Figura 4.26, está associada à categoria de impacto “Saúde Humana”.



**Figura 4.26 - Gráfico representativo dos impactos ambientais relacionados com a estrutura de madeira da habitação**

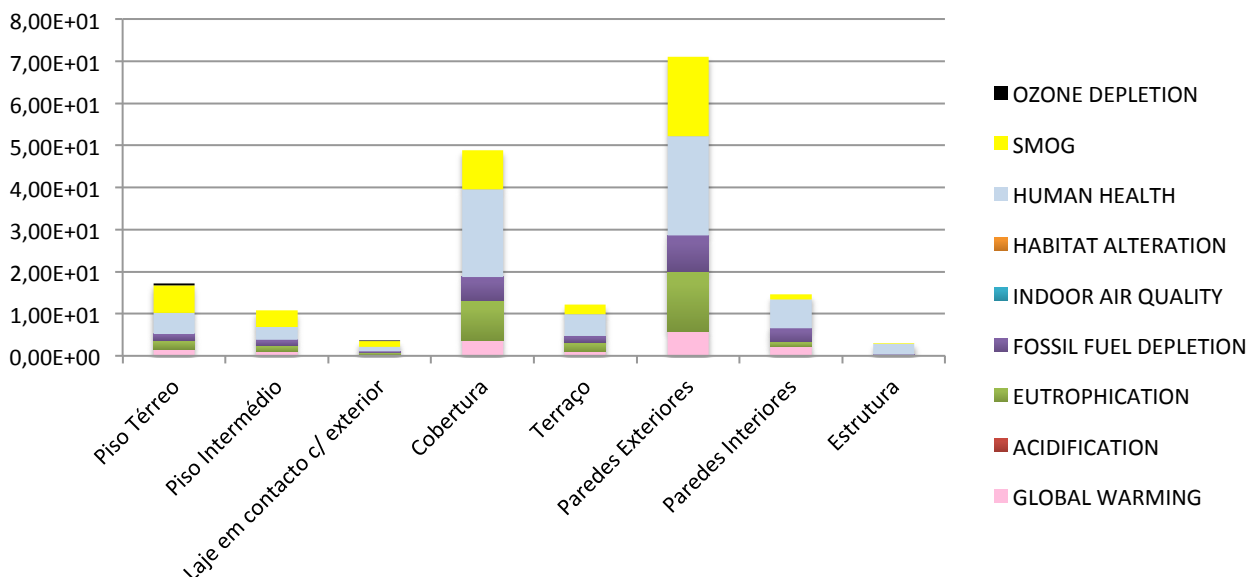
Numa perspectiva global do conjunto do edifício, é possível comparar os resultados totais dos impactos associados a cada elemento construtivo, associando-os a cada categoria de impacto ambiental, tal como representado na Tabela 4.19.

**Tabela 4.19 - Quadro-resumo dos Impactos Ambientais associados a cada elemento construtivo considerado**

CATEGORIAS DE IMPACTO	%	Piso Térreo	Piso Intermédio	Laje em contacto c/ exterior	Cobertura	Terraço	Paredes Exteriores	Paredes Interiores	Estrutura	TOTAL (categoria de impacto)
GLOBAL WARMING	11,0	1,62E+00	1,03E+00	3,38E-01	3,72E+00	9,30E-01	5,83E+00	2,20E+00	1,22E-01	1,58E+01
ACIDIFICATION	11,0	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
EUTROPHICATION	11,0	2,13E+00	1,46E+00	4,45E-01	9,37E+00	2,34E+00	1,42E+01	1,10E+00	1,22E-01	3,12E+01
FOSSIL FUEL DEPLETION	11,0	1,51E+00	1,29E+00	3,15E-01	5,67E+00	1,42E+00	8,50E+00	3,18E+00	1,22E-01	2,20E+01
INDOOR AIR QUALITY	11,0	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
HABITAT ALTERATION	11,0	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
HUMAN HEALTH	12,0	4,98E+00	3,15E+00	1,04E+00	2,07E+01	5,19E+00	2,36E+01	6,84E+00	2,57E+00	6,81E+01
SMOG	11,0	6,43E+00	3,81E+00	1,34E+00	9,40E+00	2,35E+00	1,89E+01	1,22E+00	1,22E-01	4,35E+01
OZONE DEPLETION	11,0	5,60E-01	0,00E+00	1,17E-01	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	6,77E-01
<b>TOTAL (elemento construtivo)</b>	<b>100</b>	<b>1,72E+01</b>	<b>1,07E+01</b>	<b>3,60E+00</b>	<b>4,89E+01</b>	<b>1,22E+01</b>	<b>7,10E+01</b>	<b>1,45E+01</b>	<b>3,06E+00</b>	<b>1,81E+02</b>

A visualização gráfica da informação contida no quadro anterior mostra uma clara predominância dos elementos de cobertura e paredes exteriores, para o balanço global dos impactos ambientais deste edifício (Figura 4.27). Isto deve-se não só aos materiais utilizados, que cumprem exigências de impermeabilização e isolamento térmico superiores às dos restantes elementos, mas também à superior área relativa que estes elementos representam, quando comparados com os restantes elementos construtivos.

Esta análise permite-nos concluir que, com vista à diminuição dos impactos ambientais deste edifício, os elementos que deverão ser, em primeiro lugar, alvo de estudo mais detalhado, com vista a obter resultados efetivos, são a cobertura e as paredes exteriores.



**Figura 4.27- Gráfico de síntese das Categorias de Impacto Ambiental associadas a cada elemento construtivo da solução com estrutura em madeira.**

Torna-se, assim, evidente o contributo destes dois elementos para o impacto global da solução. Na verdade, estes são os elementos que representam a maior percentagem dos materiais presentes na habitação: 266,4 m<sup>2</sup> de paredes exteriores e 80,64 m<sup>2</sup> de cobertura.

Em ambos os casos, o valor global é elevado, mas encontra-se distribuído pelas várias categorias de impacto. Analisando as paredes exteriores em particular, verifica-se que o material que representa o maior impacto relativo corresponde aos painéis OSB. Também os painéis de gesso, a membrana impermeabilizante e o revestimento em madeira de cedro apresentam valores relevantes de impacto ambiental, em particular nas categorias de eutrofização, impactos na saúde humana e *smog*. O impacto global deste elemento construtivo explica-se pelo facto de representar uma área muito significativa, de 266,40 m<sup>2</sup>, o que atribui um maior significado aos baixos impactos obtidos por cada unidade funcional.

Relativamente ao impacto ambiental da cobertura, o elevado valor obtido deve-se sobretudo à utilização de telhas asfálticas e ao reforço através de uma membrana impermeabilizante. Uma vez que a duração das telhas (definida pelo BEES) é de 20 anos, e estamos neste LCA a considerar duas operações de substituição ao longo da vida útil do edifício, estes materiais são contabilizados três vezes. Esse facto contribui claramente para uma maior expressão dos impactos associados a ambos os materiais, e reforça a já percebida necessidade de seleccionar materiais com um período de vida-útil alargado, evitando operações de substituição e, tanto quanto possível, de manutenção.

#### **4.2 Desempenho Ambiental da Solução Alternativa, com Estrutura em Aço Enformado a Frio**

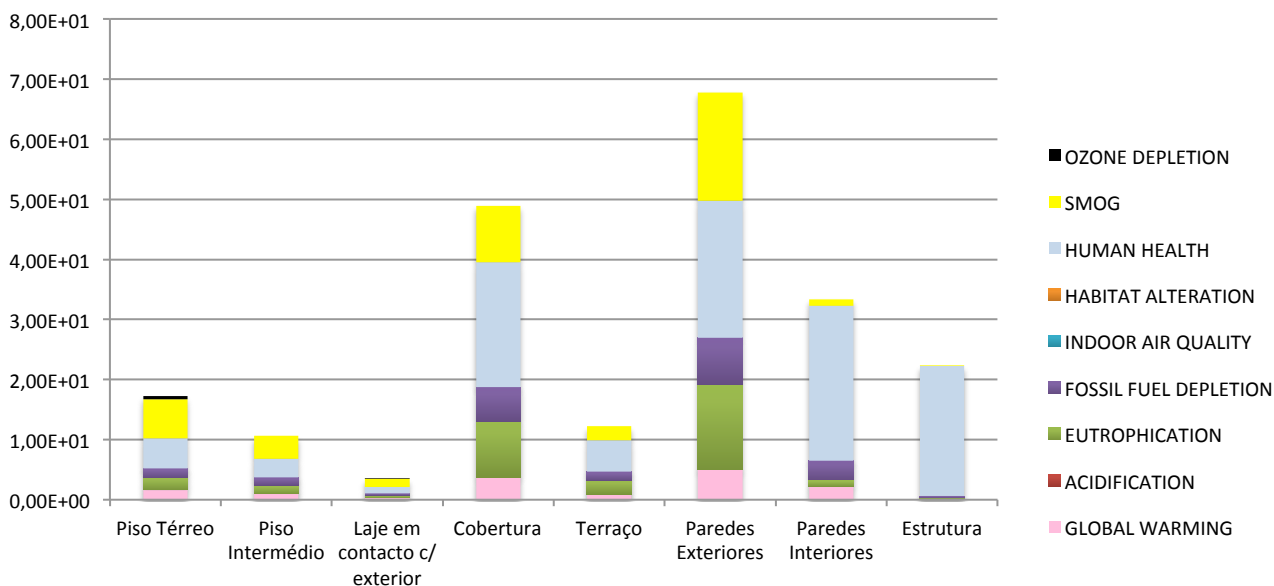
De acordo com o objectivo definido para este caso de estudo, foi experimentada uma segunda versão do mesmo edifício, em que apenas se substituiu a estrutura de madeira por uma estrutura em aço leve, o que se traduz em alterações quer no elemento “estrutura”, quer na composição das paredes interiores. As considerações relativas ao ciclo de vida dos elementos estruturais em aço enformado a frio, incluindo o cenário de fim-de-vida definido pelo *BEES* estão descritos no ponto 4.1.2.1 (pág. 66).

O resumo dos impactos ambientais para cada um dos elementos construtivos desta segunda versão é apresentado na Tabela 4.20.

**Tabela 4.20 - Quadro-resumo dos Impactos Ambientais associados a cada elemento construtivo considerado na solução “Aço enformado a frio”.**

CATEGORIAS DE IMPACTO	%	Piso Térreo	Piso Intermédio	Laje em contacto c/ exterior	Cobertura	Terraço	Paredes Exteriores	Paredes Interiores	Estrutura	TOTAL (categoria de impacto)
GLOBAL WARMING	11,0	1,62E+00	9,93E-01	3,38E-01	3,72E+00	9,30E-01	5,03E+00	2,20E+00	2,44E-01	1,51E+01
ACIDIFICATION	11,0	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	4,23E-09
EUTROPHICATION	11,0	2,13E+00	1,46E+00	4,45E-01	9,37E+00	2,34E+00	1,42E+01	1,10E+00	1,22E-01	3,12E+01
FOSSIL FUEL DEPLETION	11,0	1,51E+00	1,26E+00	3,15E-01	5,67E+00	1,42E+00	7,70E+00	3,18E+00	2,44E-01	2,13E+01
INDOOR AIR QUALITY	11,0	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
HABITAT ALTERATION	11,0	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
HUMAN HEALTH	12,0	4,98E+00	3,11E+00	1,04E+00	2,07E+01	5,19E+00	2,28E+01	2,58E+01	2,16E+01	1,05E+02
SMOG	11,0	6,43E+00	3,77E+00	1,34E+00	9,40E+00	2,35E+00	1,81E+01	1,10E+00	1,22E-01	4,26E+01
OZONE DEPLETION	11,0	5,60E-01	0,00E+00	1,17E-01	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	6,77E-01
<b>TOTAL (elemento construtivo)</b>	<b>100</b>	<b>1,72E+01</b>	<b>1,06E+01</b>	<b>3,60E+00</b>	<b>4,89E+01</b>	<b>1,22E+01</b>	<b>6,78E+01</b>	<b>3,34E+01</b>	<b>2,24E+01</b>	<b>2,16E+02</b>

A análise da informação sob a forma gráfica (Figura 4.28) permite observar padrão de impactos relativos semelhante ao da solução com estrutura em madeira (ver Figura 4.27). No entanto, e quando comparados com a solução inicial, observa-se um acréscimo dos impactos relacionados com a construção das paredes interiores e da estrutura, em particular no que concerne à categoria de impacto “Saúde Humana”.



**Figura 4.28 - Gráfico de síntese dos resultados para as várias categorias de impacto ambiental associadas a cada elemento construtivo da solução com estrutura em aço enformado a frio.**

### 4.3 Análise económica

O conceito de sustentabilidade engloba três princípios: sustentabilidade ambiental, sustentabilidade social e sustentabilidade económica. Neste estudo, não serão considerados aspectos sociais, dada a complexidade e abrangência que um estudo desse tipo implica.

No entanto, no momento de seleção por um dos sistemas construtivos, por parte de uma potencial família compradora, o factor económico será com certeza ponderado, pelo que se inclui um breve estudo sobre o custo de cada solução. Tal como estabelecido para a análise da sustentabilidade e do comportamento térmico, será considerado todo o ciclo de vida do edifício, incluindo os 50 anos de vida útil. Por limitação da base de dados utilizada (BEES), o cálculo de custos exclui a construção do edifício *in situ*, considerando apenas o custo dos materiais envolvidos e as operações destinadas à sua conservação e manutenção ao longo do período de utilização. Para cálculo da energia necessária para climatização da habitação ao longo dos 50 anos de utilização, efetuou-se uma simulação no programa *DesignBuilder*, que permitiu calcular a quantidade de energia despendida no período de tempo indicado.

O BEES fornece os valores para os custos em dólares americanos. Por uma questão de simplificação, consideramos que 1\$=1€.

Aos valores para custos futuros, foi aplicada uma taxa de desconto de 4%, utilizando a expressão seguinte:

$$X_{NPV} = \sum (C_n \times q) = \sum_{n=1}^p \frac{C_n}{(1 + d)^n}$$

**Equação 1 - Expressão utilizada para determinação do custo futuro**

Em que:

XNPV – valor presente líquido;

n – número de anos decorridos entre o ano de referência e o ano da ocorrência do custo;

C<sub>n</sub> – custo no ano n;

q – factor de desconto;

d – taxa de desconto real;

p – período de análise.

Os resultados obtidos agrupam-se segundo o “custo inicial”, o “custo futuro” e o “custo de ciclo de vida” de cada elemento construtivo, de acordo com os valores fornecidos pela base de dados utilizada (BEES). Alguns dos materiais e, conseqüentemente, dos elementos construtivos



considerados, apresentam valor negativo para o “Custo Futuro”, o que se deve ao facto de a base de dados considerar que alguns materiais (por exemplo, o aço) apresentam um valor residual no final da sua vida útil, permitindo, em última análise, a sua venda para posterior reciclagem. Os resultados estão sintetizados na Tabela 4.21 no que respeita à solução-base, com estrutura em madeira, e na Tabela 4.22 para a solução em aço leve.

**Tabela 4.21 - Balanço económico da solução com estrutura em madeira (\$)**

	Piso Térreo	Piso Intermédio	Laje em contacto c/ exterior	Cobertura	Terraço	Paredes Exteriores	Paredes Interiores	Estrutura	TOTAL
<b>Custo Inicial</b>	17.325,84	8.391,11	3.619,86	22.162,56	5.540,64	38.855,92	5.646,67	3.263,33	104.805,94
<b>Custo Futuro</b>	-291,20	-66,20	-60,84	220,02	55,00	2.368,00	-158,89	-158,89	1.907,00
<b>Custo de Ciclo-de-Vida</b>	17.034,64	8.324,91	3.559,02	22.382,58	5.595,64	41.223,92	5.487,78	3.104,44	<b>106.712,94</b>

**Tabela 4.22 - Balanço económico da solução com estrutura em aço enformado a frio (\$)**

	Piso Térreo	Piso Intermédio	Laje em contacto c/ exterior	Cobertura	Terraço	Paredes Exteriores	Paredes Interiores	Estrutura	TOTAL
<b>Custo Inicial</b>	17.325,84	8.391,11	3.619,86	22.162,56	5.540,64	38.855,92	6.086,67	3.703,33	105.685,94
<b>Custo Futuro</b>	-291,20	-66,20	-60,84	220,02	55,00	2.368,00	-171,11	-171,11	1.882,56 \$
<b>Custo de Ciclo-de-Vida</b>	17.034,64	8.324,91	3.559,02	22.382,58	5.595,64	41.223,92	5.915,56	3.532,22	<b>107.568,50</b>

#### 4.4 Comparação das duas soluções

O objectivo desta análise de ciclo de vida é comparar o desempenho ambiental e económico das duas opções de materiais disponíveis para estruturas “ligeiras”: madeira e aço leve. De acordo com o objectivo definido, estabeleceu-se uma comparação direta entre as duas soluções, sintetizada na Figura 4.29 no que respeita ao desempenho ambiental, e na Figura 4.30 no que respeita ao desempenho económico.

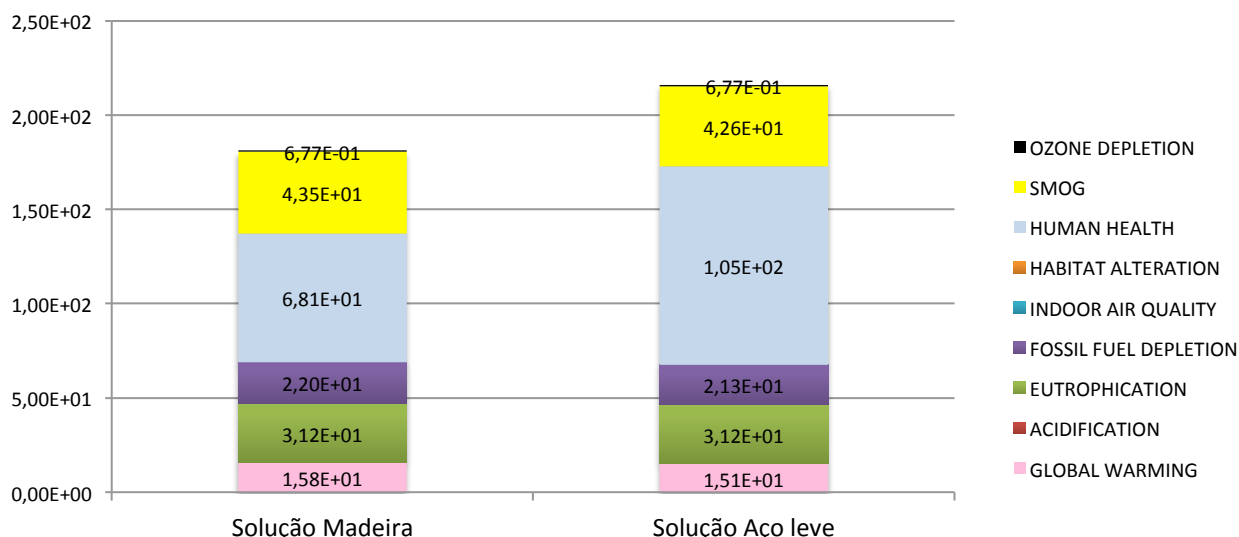


Figura 4.29 - Comparação do desempenho ambiental das duas soluções em estudo

Tal como se pode observar na Figura 4.29, a solução com estrutura em madeira apresenta melhor desempenho ambiental, especialmente no que concerne à categoria de impacto “Saúde Humana”. Relativamente aos indicadores “Smog”, “Aquecimento Global” e “Esgotamento dos combustíveis Fósseis”, a solução em aço apresenta um resultado ligeiramente mais vantajoso. No entanto, de uma forma global, os impactos da solução com estrutura em madeira são 0,19% inferiores aos da solução com estrutura em aço leve.

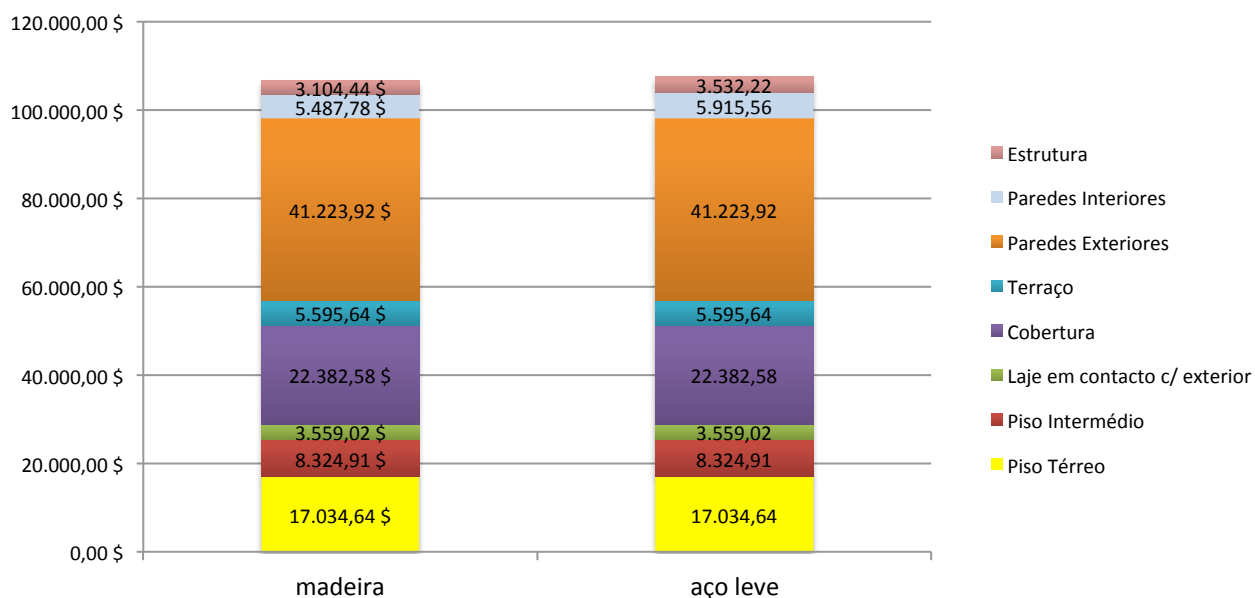


Figura 4.30 - Comparação do desempenho económico das duas soluções em estudo (Custo de Ciclo de Vida)

Relativamente ao desempenho económico, a diferença é ainda menos expressiva, sendo o custo da solução em madeira, no conjunto do ciclo de vida, inferior ao da solução em aço leve. No entanto, a aferição deste valor global deveria ser complementada com um balanço energético que

permitisse comparar a eventual diferença de consumo de energia para climatização no conjunto dos 50 anos de utilização, uma vez que, como sabemos, a madeira e o aço leve têm comportamento térmico substancialmente diferente.

#### 4.5 Discussão de resultados

Da prossecução desta ACV comparativa do conjunto de um edifício, ressaltam algumas ideias centrais:

- A análise social não é considerada em ferramentas de uso simples como o *BEES*, que apenas inclui aspectos de ordem ambiental e económica.

- No conjunto de um edifício, os elementos que se podem considerar como prioritários na intervenção com vista a diminuir a globalidade dos impactos são aqueles que representam a maior percentagem dos materiais e processos envolvidos. Isto corresponde, normalmente, à envolvente do edifício, sujeita aos mais exigentes requisitos funcionais.

- O armazenamento de dióxido de carbono é considerado pelo *BEES*, numa proporção de 1kg de CO<sub>2</sub> por cada 1,84 kg de madeira seca. Apesar disso, os resultados relativos à Categoria de Impacto “Potencial de Aquecimento Global” são positivos. Apesar de o *BEES* não permitir uma análise detalhada de quais os processos que contribuem de forma mais afirmativa para os resultados apresentados para uma determinada unidade funcional em análise, pela descrição presente no manual do utilizador (Lippiat, 2007) pode supor-se que este valor positivo se deve à inclusão de vários processos necessários à produção da madeira, nomeadamente cultivo, transporte, transformação em material de construção, entre outros.

- Quanto às “fronteiras do sistema” dos produtos de madeira, o *BEES* assume um alargado âmbito temporal, que se inicia na produção de sementes que antecede a plantação das árvores, e termina com a deposição da madeira em aterro, não considerando nenhum processo de valorização após a sua vida útil.



## 5. CASO DE ESTUDO 2

Neste segundo caso de estudo, definiu-se como objectivo a realização de uma análise de sensibilidade, com vista a determinar quais os materiais ou particularidades da construção com estrutura em madeira, que representam os maiores impactos ambientais, e com isso diagnosticar quais os aspectos que carecem de maior atenção quando o objectivo é aumentar a sustentabilidade da construção.

Este caso de estudo centra-se sobre uma habitação unifamiliar pré-fabricada já construída, sendo a quantidade de materiais e processos envolvidos fornecida diretamente pelo fabricante. O software utilizado nesta segunda ACV foi o *GaBi 4* (GaBi 4: Software and data base for Life Cycle Engineering, 2007). Após a quantificação dos impactos associados com a versão-base definida, foram testadas variações em alguns parâmetros, tais como o cenário de fim-de-vida ou as necessidades de transporte, numa análise de sensibilidade com vista a determinar quais os factores que produzem maior variação dos impactos ambientais no conjunto do ciclo de vida analisado.

Portugal tem muito baixo nível de produção de madeiras para fins estruturais, sendo que a maioria da madeira disponível percorre distâncias consideráveis, dado que provém frequentemente de países do Norte da Europa ou da América do Norte. No entanto, o ciclo de vida de um edifício de madeira inclui diversas fases e estende-se por um alargado período de tempo, pelo que importa perceber qual a importância relativa que os impactos associados ao transporte assumem na globalidade do desempenho da construção. Nesse sentido, esta avaliação de ciclo de vida tem como objectivo determinar o impacto da variação de factores que, tal como o transporte, são parte integrante do Ciclo de Vida dos edifícios de madeira, e que devem por isso ser ponderados desde a fase de projeto, refletindo-se em opções tais como o tipo de madeira a utilizar ou a sua proveniência.

### 5.1 Objectivos e âmbito do estudo

A unidade funcional definida neste segundo caso de estudo, foi, tal como no primeiro caso, uma habitação unifamiliar com estrutura em madeira. Assumiu-se que o edifício foi pré-fabricado em Vila Nova de Cerveira (Portugal), e montado na periferia da cidade Paris (França). Implanta-se num lote urbano estreito e tem uma arquitetura comum (ver Figura 5.1). Pode considerar-se que, mesmo que outro material estrutural tivesse sido utilizado em vez da madeira (betão ou aço, por exemplo), a forma do edifício seria virtualmente a mesma.

---

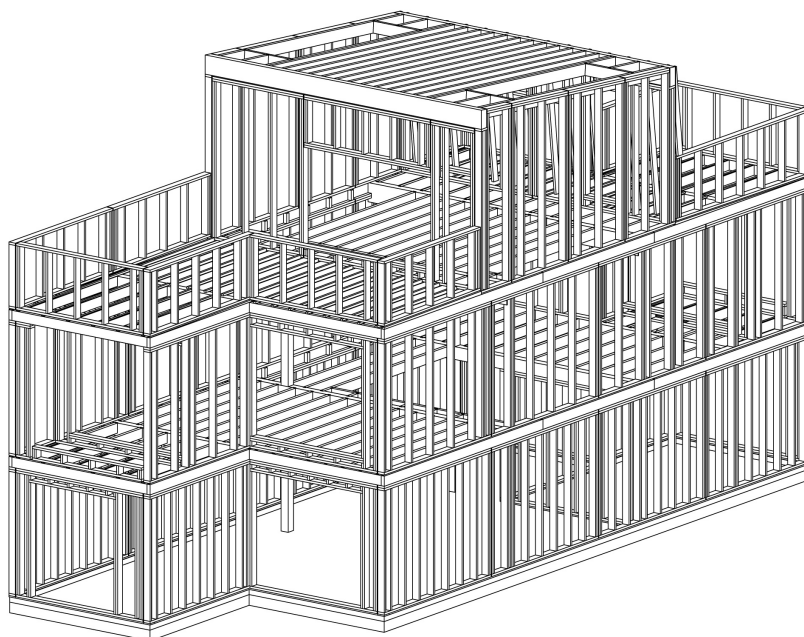


Figura 5.1 - Imagem da casa já finalizada, vista do logradouro (foto fornecida pelo fabricante)

As fronteiras do sistema definidas para a prossecução desta ACV incluem todos os elementos que caracterizam este tipo de construção, com exceção para aqueles que não são dependentes ou interligados com o sistema estrutural adoptado, tais como a caixilharia, acabamentos de pavimentos, equipamentos sanitários e de cozinha, entre outros.

As fundações deste tipo de construção são normalmente executadas em betão armado, mesmo quando todo o sistema estrutural acima do nível do solo é em madeira. Os requisitos impostos aos elementos de fundação são tanto maiores quanto maior é a carga que suportam. A madeira, tal como o aço leve, apresenta uma relação peso-resistência que permitem classificar os sistemas estruturais executados com base nestes materiais como “leves”, quando comparados com outros sistemas estruturais comuns, como é o caso de betão armado. Logo, neste tipo de construção “leve” os requisitos impostos às fundações são menores do que os associados à construção em betão. No entanto, visto que o âmbito deste estudo se centra em sistemas estruturais leves, no âmbito da ACV serão excluídas as fundações do edifício.

De forma resumida, os elementos incluídos neste estudo são a estrutura acima do nível do solo e as paredes exteriores, tal como representado na Figura 5.2. Esta ACV não inclui a energia necessária à montagem (ou construção) da casa *in-situ*, assim como a energia necessária à sua operação (aquecimento, águas, equipamentos domésticos) e manutenção.



**Figura 5.2 - Sistema Estrutural da casa**

De acordo com a metodologia “CML2001 – Dec.07”, as categorias de impacto consideradas nesta ACV foram: “Esgotamento Abiótico” (ADP), “Potencial de Acidificação” (AP), “Potencial de Eutrofização” (EP), “Potencial de Aquecimento Global” (GWP 100 years), “Destrução da Camada de Ozono” (ODP, steady state) e “Criação Fotoquímica de Ozono” (POCP).

As quantidades e características dos materiais considerados no inventário foram fornecidas pela empresa fabricante da casa (Rusticasa). As quantidades são reais e foram verificadas, na medida em que a habitação foi de facto construída, e o inventário corresponde à lista completa dos materiais utilizados durante a construção. Relativamente à energia e emissões relativos à fase de fabrico da habitação, estes são difíceis de estimar para este caso concreto. De facto, no conjunto da produção corrente do fabricante, este tipo de estruturas “leves” representa uma fracção muito reduzida dos consumos e das emissões anuais, devido ao facto de se tratar de um sistema muito elementar, que se serve de ferramentas simples e utiliza reduzidas quantidades de energia e maquinaria relativamente *low-tech*. Numa análise mais detalhada, seria útil efetuar um levantamento exaustivo dos processos e consumos associados à produção de uma unidade funcional semelhante à definida nesta ACV. No entanto, no âmbito deste estudo, a energia associada ao processo de pré-fabricação não será considerada.

A quantificação dos impactos ambientais associados a cada um dos produtos e processos considerados no inventário, partiu da base de dados da versão “Estudante” do Software “GaBi” (PE

International, 2007). Procurou-se o maior rigor possível na associação de cada material específico, nomeadamente os vários tipos de madeira e seus derivados, aos materiais disponíveis na base de dados. Relativamente à quantificação dos impactos associados ao transporte, as distâncias foram quantificadas de forma o mais realista possível, através de simulações em sites de empresas transportadoras no caso das vias marítimas, e usando a ferramenta disponível no site “Via Michelin” ([www.viamichelin.com](http://www.viamichelin.com)) para cálculo de distâncias a percorrer por via terrestre, em estradas europeias.

Pelas razões expostas, considera-se que o inventário utilizado na ACV possui um grau de fiabilidade e precisão ajustado ao âmbito e objectivos definidos para este estudo.

## 5.2 Análise de Inventário para o Ciclo de Vida

O ciclo de vida da habitação unifamiliar em madeira que é objecto deste estudo, pode dividir-se em 5 fases distintas.

A primeira corresponde à construção das fundações em betão, que irão servir de base à edificação acima do nível do solo (Figura 5.3). Esta operação tem necessariamente que realizar-se no local da obra, atendendo aos cuidados necessários para que seja totalmente compatível com a restante estrutura pré-fabricada que estará a ser preparada num outro local, neste caso distante. Independentemente do sistema estrutural e demais opções construtivas adoptadas, é transversal a necessidade da execução das fundações. Tal como descrito no primeiro caso de estudo, é um facto consensual que os sistemas estruturais ligeiros, tais como a madeira e o aço leve, caracterizam-se por uma maior economia nas fundações relativamente a outros sistemas com maior massa. No entanto, e visto que a construção de fundações não é uma necessidade intrínseca à construção em madeira, sendo comum a todos os sistemas construtivos, esta primeira fase foi excluída do âmbito desta avaliação de ciclo de vida.



Figura 5.3 - Fundações em betão (fonte: <http://precast.org>)

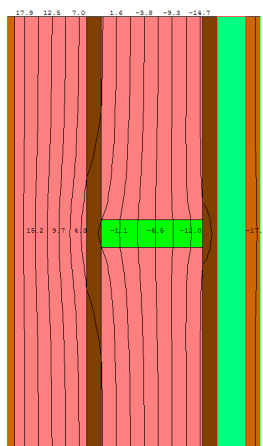
---



A segunda fase - que pode ocorrer em simultâneo ou até anteriormente à primeira fase apresentada – corresponde ao processo de pré-fabricação da casa, em ambiente industrial, com base no projeto preciso dos elementos necessários para a construção da casa. São conhecidas as vantagens da pré-fabricação, nomeadamente a nível de economia de tempo e recursos, conseguindo otimizar-se o processo de fabrico, minimizar os desperdícios (que, quando existem, poderão ser encaminhados para reciclagem de forma mais eficiente do que na construção *in-situ*), e também no que respeita ao controlo da qualidade e precisão. No caso do edifício em análise, todos os elementos estruturais são produzidos em fábrica e posteriormente transportados para o local da construção por via terrestre, em camião. O processo de fabrico carece apenas de ferramentas muito simples, que consomem pequenas quantidades de energia, tais como serras eléctricas de reduzida dimensão e berbequins. O facto de se tratar de um processo elementar, permite que uma pequena carpintaria, apenas dotada com os meios técnicos necessários para coordenar o processo de pré-fabricação, seja capaz de produzir este tipo de estrutura de madeira. Dado que as quantidades de energia necessárias aos processos descritos nesta fase são difíceis de medir e pouco significativas, não serão incluídas neste estudo.

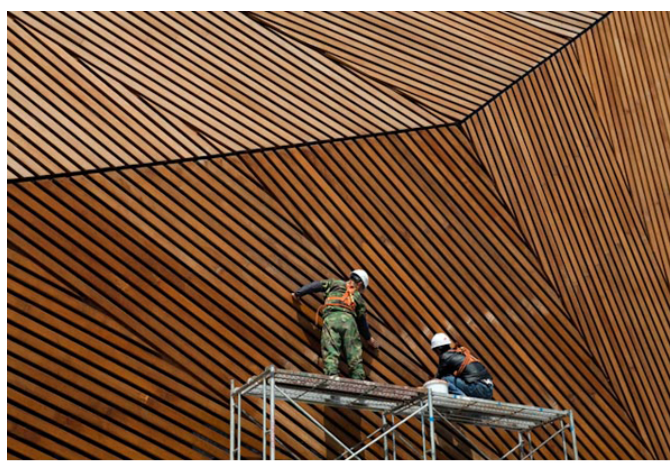
A terceira fase definida para a construção deste edifício é a montagem, *in-situ*, dos elementos preparados em fábrica. No local de construção, as peças são descarregadas com recurso a máquinas simples tais como um empilhador ou uma pequena grua. A associação dos elementos de madeira, para montagem da estrutura propriamente dita, serve-se de elementos de ligação em aço inox, tais como parafusos e esquadros, que são também contabilizados no inventário. À semelhança da energia necessária para a segunda fase definida, também aqui se considera que as quantidades não são relevantes e por isso assume-se a sua exclusão deste estudo.

A operação e manutenção do edifício, ao longo dos 50 anos definidos como período de vida útil, corresponde à quarta fase delimitada no conjunto da vida da habitação unifamiliar. É possível efetuar a simulação do comportamento térmico do edifício, para uma localização geográfica e clima definidos de forma realista, considerando o uso por um determinado número de pessoas, segundo condições de conforto predefinidas. Essa simulação é útil para avaliar o comportamento do edifício segundo a perspectiva da “física da construção”, dado que os diferentes materiais e métodos construtivos adoptados resultam em diferentes níveis de desempenho (Figura 5.3). Contudo, a realização de uma simulação deste tipo ultrapassa o âmbito e objectivos definidos para esta ACV, pelo que a quantidade de energia de operação não será considerada.



**Figura 5.4 - Diagrama de comportamento térmico de uma parede exterior com estrutura e revestimento em madeira (Coelho e Lopes, 2012)**

Relativamente às operações de manutenção, a indicação do fabricante é no sentido de não ser necessária qualquer substituição parcial de elementos, durante os 50 anos de utilização. Operações regulares de limpeza e pinturas poderão ser necessárias, mas decorrem de práticas correntes de manutenção, não sendo específicas para este tipo de estrutura. O *Cedro Vermelho do Canadá* utilizado no revestimento das fachadas é extremamente resistente ao desgaste ambiental e adaptado à função em causa (Figura 5.5). O fabricante garante que este não carece de nenhuma operação de manutenção, nem mesmo pintura, para o período de vida útil considerado. Por necessidade de simplificação e agilização da ACV, esta quarta fase definida – de manutenção e operação do edifício – não será quantificada, apesar de ficar prevista no modelo do ciclo de vida e poder vir a ser completada em eventuais desenvolvimentos posteriores.



**Figura 5.5 - Cedro vermelho do Canadá aplicado na fachada do Pavilhão do Canadá na Expo 2010 (foto de Katarina Stuebe, fonte: <http://www.expo2010canada.gc.ca>)**

A quinta e última fase de entre as quais se pode dividir o ciclo de vida da unidade funcional proposta, corresponde ao desmantelamento do edifício e encaminhamento dos materiais para o

respectivo fim-de-vida, após os 50 anos definidos para o seu uso em serviço. No desmantelamento de um edifício, poderá ser difícil proceder à correta e eficiente separação dos materiais de construção que o compõe, sobretudo se estes estiverem ligados de forma “química”, nomeadamente através de colas e outros produtos ligantes. Sendo assim, é de esperar que muitos dos materiais estejam unidos de tal forma que não possam ser separados, ou que estejam em avançado estado de degradação, de tal forma que a sua valorização se torna inviável, sendo inevitavelmente depositados em aterro. Nassén (2012) afirma que as estimativas relativas à percentagem de material que é separado e encaminhado para valorização, variam muito de autor para autor, sendo difícil estabelecer um padrão. Apesar de ressaltar um certo nível de incerteza, este autor assume uma taxa de reciclagem de 80% para a madeira, o que parece ser um valor razoável, tendo em conta que a reciclagem da madeira não significa apenas a sua utilização como matéria-prima para o fabrico de novos produtos mas também, nos casos em que isso não seja viável, poder significar a sua combustão para produção de energia. O mesmo autor conclui que, se for considerada a escala temporal na ACV, a taxa de reciclagem não produz variação significativa nos resultados, uma vez que é um acontecimento previsto para um futuro distante em que, de acordo com as previsões do modelo do autor, as emissões de CO<sub>2</sub> dos sistemas de energia se assumem ser reduzidas.

Diferentes cenários de fim-de-vida são propostos nesta ACV, para análise de sensibilidade dos impactos associados a cada opção.

O esquema representativo do ciclo de vida da casa, com as respectivas quantidades de materiais consideradas, está representado na Figura 5.6. Por seu lado, a Figura 5.7 mostra de que forma o ciclo de vida da habitação foi modelado no software *GaBi 4* (PE International, 2007): distribuído por quatro diferentes “planos”, sendo que o primeiro (Pré-fabricação) e o último (Fim-de-vida) são desenvolvidos com mais detalhe como planos independentes. A modelação do plano independente “Pré-fabricação” está representada com detalhe na Figura 5.8. Relativamente à fase de Construção e de Utilização, estas são indicadas no plano geral, mas os planos são deixados “vazios”, preparados apenas para eventuais futuros desenvolvimentos. Isto deve-se ao facto de, nesta ACV, estar a ser excluída a quantificação da energia e demais processos necessários à montagem do edifício *in-situ*, assim como a sua manutenção e operação ao longo da vida útil.

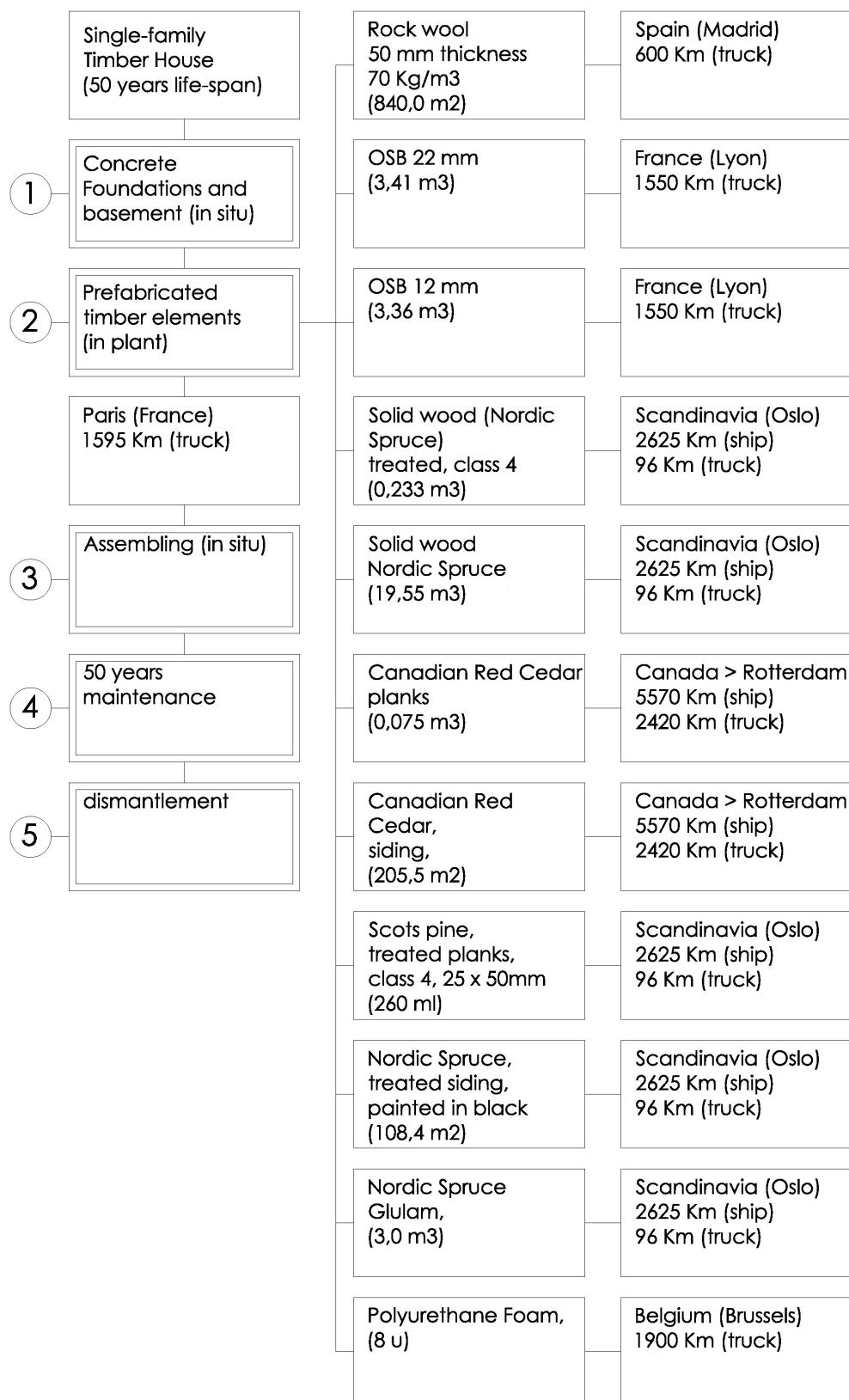


Figura 5.6 - Diagrama do ciclo de vida da casa em estudo, com indicação das quantidades de matérias-primas consideradas e respectivas distâncias de transporte para cada material

V1 Life-cycle of a Single-family Timber House

GaBi 4 process plan: Reference quantities  
The names of the basic processes are shown.

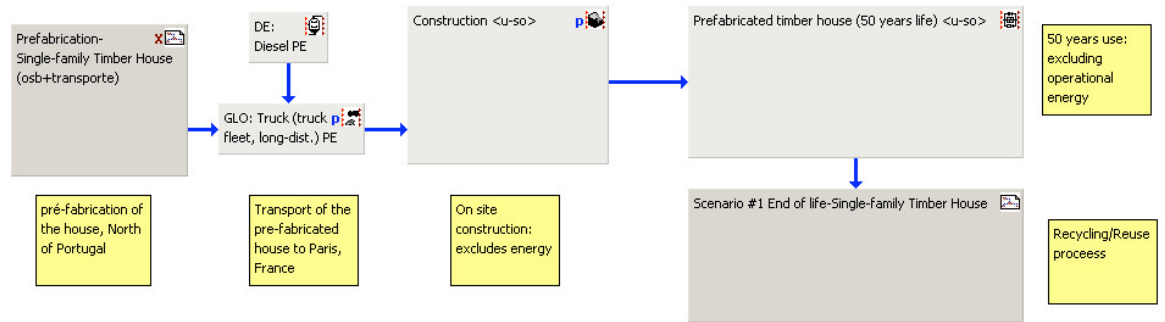


Figura 5.7 - Modelação do ciclo de vida da habitação, no software GaBi 4 (PE International, 2007)

Prefabrication- Single-family Timber House

GaBi 4 process plan: Mass [kg]  
The names of the basic processes are shown.



Figura 5.8 - Modelação dos fluxos associados à pré-fabricação do edifício, no software GaBi (PE International, 2007)

### 5.2.1 Cenários de fim-de-vida

Foram definidos três cenários diferentes, com vista a aferir as variações provocadas pelas opções de fim-de-vida, para as várias categorias de impacto ambiental, de acordo com a Tabela 5.1.

**Tabela 5.1 - Resumo dos cenários de fim-de-vida considerados**

	<b>Cenário 1</b>	<b>Cenário 2</b>	<b>Cenário 3</b>
<b>Madeira Maciça</b>	80% reciclagem 20% aterro	100% reciclagem	100% aterro
<b>Produtos de Madeira</b>	80% biocombustível 20% aterro	100% biocombustível	100% aterro
<b>Ligações em Aço</b>	80% reciclagem 20% aterro	100% reciclagem	100% aterro
<b>Pregos em Aço</b>	20% reciclagem 80% aterro	100% reciclagem	100% aterro
<b>PVC</b>	80% reciclagem 20% aterro	100% reciclagem	100% aterro

No primeiro cenário, considera-se uma proporção geral de 80% de reciclagem para os resíduos de aço e madeira: a madeira maciça é separada numa percentagem de 80% relativamente ao total existente no edifício; após a separação, é encaminhada para reciclagem, sendo posteriormente utilizada como matéria-prima para produção de derivados de madeira, evitando assim o uso de quantidades equivalentes de nova madeira (verde). Relativamente aos derivados de madeira presentes no edifício aquando do seu desmantelamento, estes são encaminhados para a produção de biocombustível, numa percentagem de 80%. Para que o processo de combustão dos resíduos de madeira ocorra de forma a causar o mínimo impacto ambiental possível (sendo que, como sabemos, a combustão da madeira leva à libertação para o ambiente do dióxido de carbono presente nos seus tecidos), deverá existir o cuidado, em fase de projeto e de execução, de evitar o uso de produtos agressivos para o ambiente, tais como determinadas tintas, vernizes e produtos de proteção, que poderão levar à libertação de substâncias tóxicas aquando da combustão da madeira no final da sua vida útil. O aço é conhecido pelo seu eficiente processo de reciclagem, que representa um decréscimo muito significativo das necessidades de energia requeridas para o fabrico de novos produtos, quando comparado com a produção a partir de matéria-prima virgem (Gervásio, 2010). Neste primeiro cenário, considera-se uma reciclagem de 80% da quantidade de aço presente em peças relativamente fáceis de separar, tais como parafusos, esquadros e outros elementos de

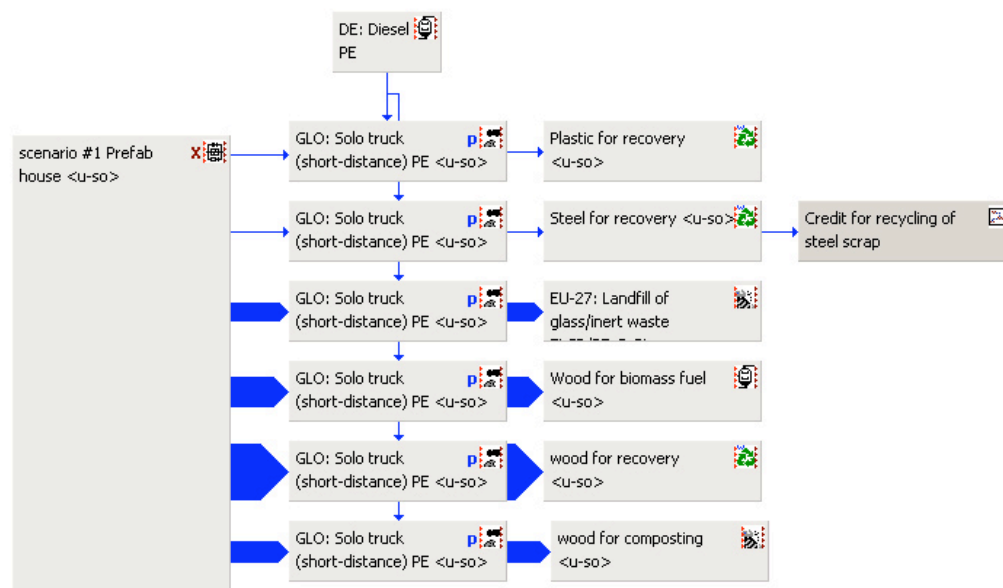
ligação. Assume-se que 20% destes elementos acabarão por ser depositados em aterro, conjuntamente com a madeira e outros materiais aos quais estão ligados, por eventuais dificuldades e limitações no processo de separação. Por seu lado, assume-se um maior dificuldade em separar os pregos de aço utilizados na construção. A sua separação dos elementos de madeira obriga a um processo mais demorado, o que é um esforço adicional que poderá não ter influência significativa nos resultados. Neste primeiro cenário, prevê-se uma taxa de separação de 20% para os pregos de aço, assumindo que 80% dos mesmos acabam por ser depositados em aterro. As quantidades de cada material consideradas no inventário relativo ao fim-de-vida deste primeiro cenário definido, são as indicadas na Tabela 5.2.

**Tabela 5.2 - Inventário de materiais para o primeiro cenário de fim-de-vida definido (Cenário 1)**

Reciclagem: derivados de madeira (kg)	Produção de bio-combustível (kg)	Resíduos de madeira em aterro (kg)	Outros resíduos sólidos em aterro (kg)	Reciclagem: produtos de aço (kg)	Reciclagem: PVC (kg)
8825,5	5048,1	3468,4	2965,8	253,1	3,6

**Scenario #1 End of life-Single-family Timber House**

GaBi 4 process plan: Mass [kg]  
The names of the basic processes are shown.



**Figura 5.9 - Modelação do cenário 1 de fim-de-vida, no software GaBi (PE International, 2007)**

No segundo cenário definido para o fim-de-vida da habitação, assume-se que toda a madeira, aço e PVC existentes são separados, sendo na sua totalidade conduzidos para o respectivo processo de reciclagem. Tal como no primeiro cenário definido, toda a madeira não sujeita a tratamento químico durante a fase de construção e utilização, é utilizada para produção de derivados de madeira. Os derivados de madeira já existentes na casa, assim como a madeira protegida de forma



química (por exemplo, com tintas de proteção), são utilizados como biomassa para produção de energia.

**Tabela 5.3 - Inventário de materiais considerados no segundo cenário de fim-de-vida (Cenário 2)**

Reciclagem: derivados de madeira (kg)	Produção de biocombustível (kg)	Resíduos de madeira em aterro (kg)	Outros resíduos sólidos em aterro (kg)	Reciclagem: produtos de aço (kg)	Reciclagem: PVC (kg)
11031,9	6310,1	0	2940	277,9	4,6

O terceiro cenário de fim-de-vida (Tabela 5.4) dispensa todos os processos de reciclagem e reutilização. Considera que todos os resíduos de demolição do edifício, após os 50 anos de utilização, são depositados em aterro de forma indiferenciada, sem qualquer separação ou valorização.

**Tabela 5.4 - Inventário de materiais considerados no terceiro cenário de fim-de-vida (Cenário 3)**

Resíduos sólidos em aterro (kg)

20588

### 5.3 Análise de Sensibilidade

Com o objectivo de analisar a sensibilidade dos impactos ambientais, relacionando-os com as diversas variáveis envolvidas no conjunto do ciclo de vida da habitação, definiram-se 5 cenários, a partir da versão-base. O resumo dos 5 cenários é apresentado na Tabela 5.5.

A versão-base corresponde ao inventário descrito atrás, considerando como fim-de-vida o Cenário 1. A primeira variação é designada por V2: é em tudo semelhante à primeira versão, excepto no que respeita aos painéis de OSB, que são substituídos por painéis de contraplacado. Esta variação pretende contribuir para a discussão sobre qual dos dois materiais, de possível utilização para cumprimento da mesma função, constitui a melhor opção do ponto de vista da sustentabilidade.

A segunda variação é designada por V3. Este cenário tem como objectivo a quantificação dos impactos relacionados com a pré-fabricação de um produto de grandes dimensões em Portugal, para ser montado e utilizado em França. Virtualmente, esta versão da ACV avalia a hipótese de a habitação ser pré-fabricada e montada dentro de um raio geográfico reduzido. No entanto, esta versão assume que a madeira provém dos mesmos países fornecedores considerados na versão-base, ou seja, grande parte dos materiais utilizados percorrem uma longa distância, seja por via marítima, terrestre ou ambas, desde o local de aquisição e produção, até à fábrica onde a casa será pré-fabricada.

A variação com a designação V4 assume o cenário, embora um pouco irrealista, em que a totalidade dos materiais presentes no edifício, no momento da demolição, são separados e encaminhados para valorização de acordo com as suas características, segundo o cenário de fim-de-vida nº2 anteriormente definido (ver Tabela 5.3). O objectivo deste cenário é avaliar as vantagens do empreendimento de um esforço suplementar no processo de separação de materiais, o que significa um maior investimento de tempo, energia e meios no processo de demolição.

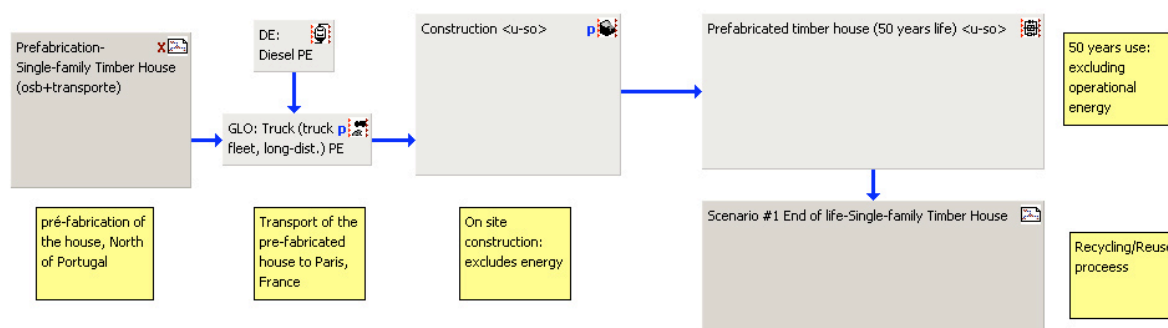
Pelo contrário, a V5 pretende estudar a hipótese contrária, em que a totalidade dos resíduos são depositados em aterro, de forma indiferenciada.

**Tabela 5.5 - Quadro-resumo das variáveis analisadas**

Breve descrição	Fim-de-vida
V1 Versão-base, de acordo com o inventário	Cenário 1
V2 Versão-base, excepto: substituição dos painéis OSB por painéis de contraplacado	Cenário 1
V3 Versão-base, excepto: remoção do transporte da casa pré-fabricada de Portugal para França (assume-se que a casa é pré-fabricada e construída no mesmo local)	Cenário 1
V4 Versão-base, assumindo 100% de reciclagem dos produtos de aço e madeira	Cenário 2
V5 Versão-base, assumindo 0% de reciclagem (100% dos produtos depositados em aterro)	Cenário 3
V6 Versão-base, excepto: remoção de todas as necessidades de transporte (casa Pré-fabricada com produtos de origem local, para ser construída nas proximidades da fábrica)	Cenário 1

**V1 Life-cycle of a Single-family Timber House**

GaBi 4 process plan:Reference quantities  
The names of the basic processes are shown.



**Figura 5.10 - Modelação do ciclo-de-vida da versão 1, no software GaBi (PE International, 2007)**

## 5.4 Avaliação dos Impactos de Ciclo de Vida

A avaliação dos impactos ambientais do ciclo de vida da habitação seguiu as categorias de impacto definidas no painel “CML2001 – Dec.07”, utilizando os factores de normalização listados na Tabela 5.6.

**Tabela 5.6 - Factores de normalização para as categorias de impacto consideradas**

Quantidade	Equivalências	Unidades	Factor
Abiotic Depletion (ADP)	1,69E+10	kg Sb-Equiv.	5,92E-11
Acidification Potential (AP)	1,68E+10	kg SO <sub>2</sub> -Equiv.	5,95E-11
Eutrophication Potential (EP)	1,85E+10	kg Phosphate-Equiv.	5,41E-11
Global Warming Potential (GWP 100 years)	5,21E+12	kg CO <sub>2</sub> -Equiv.	1,92E-13
Ozone Layer Depletion Potential (ODP, steady state)	7,70E+06	kg R11-Equiv.	1,30E-07
Photochem. Ozone Creation Potential (POCP)	2,66E+09	kg Ethene-Equiv.	3,76E-10

Os resultados obtidos para a versão-base do ciclo de vida do edifício estão listados na Tabela 5.7, agrupados de acordo com as três fases definidas no modelo de ACV: pré-fabricação (inclui aquisição e transporte das matérias primas até à fábrica), transporte da casa já pré-fabricada do local de fabrico (Norte do Portugal) para o local de construção (Paris, França), e, por fim, o fim-de-vida.

**Tabela 5.7 - Resultados da ACV para a versão 1**

Impactos das Categorias	Unidades	Total	Pré-fabricação	Transporte	Fim-de-vida
Abiotic Depletion (ADP)	kg Sb-Equiv.	<b>3,31E-07</b>	3,29E-07	1,82E-09	2,31E-10
Acidification Potential (AP)	kg SO <sub>2</sub> -Equiv.	<b>9,16E-07</b>	9,15E-07	1,61E-09	1,58E-10
Eutrophication Potential (EP)	kg Phosphate-Equiv.	<b>8,41E-08</b>	8,38E-08	2,54E-10	4,31E-11
Global Warming Potential (GWP 100 years)	kg CO <sub>2</sub> -Equiv.	<b>-4,47E-07</b>	-4,48E-07	8,85E-10	1,38E-10
Ozone Layer Depletion Potential (ODP, steady state)	kg R11-Equiv.	<b>2,01E-09</b>	2,01E-09	9,90E-13	-1,43E-12
Photochem. Ozone Creation Potential (POCP)	kg Ethene-Equiv.	<b>3,83E-07</b>	3,82E-07	8,22E-10	1,39E-10

O valor que suscita maior atenção, numa primeira análise do quadro, refere-se ao “Potencial de Aquecimento Global”. De facto, trata-se de um valor negativo, o que significa que o impacto da construção considerada, visto sob o prisma deste indicador, é positivo. Isto constitui uma grande

diferença relativamente à base de dados utilizada pelo *BEES* no primeiro caso de estudo (Capítulo 4), que atribui valores positivos de “Potencial de Aquecimento Global” aos produtos de madeira.

Comparando os impactos das diferentes fases definidas na ACV da habitação em madeira, podemos concluir que a larga maioria dos impactos estão associados com a fase de “Pré-fabricação” (99,38% do Potencial de Esgotamento Abiótico), correspondendo apenas 0,07% deste impacto à fase de fim-de-vida e 0,55% ao transporte da casa desde o local de fabrico até ao local da obra. Para as restantes categorias de impacto estudadas, a proporção verificada entre os impactos alocados a cada uma das fases modeladas é ainda menos expressiva.

Esta desproporção entre os impactos alocados a cada uma das fases, explica-se através da forma utilizada para modelar o ciclo de vida do edifício. De facto, a fase de pré-fabricação é modelada com detalhe, quantificando todos os produtos envolvidos no processo, e o longo percurso que a maioria deles percorre até à entrada no “portão” da fábrica. A fase seguinte, de transporte da casa pré-fabricada de Portugal até França, por via terrestre, embora também modelada de forma realista, representa um impacto relativamente reduzido. O mesmo se verifica relativamente ao fim-de-vida que, apesar de ser modelado com detalhe, incluindo mesmo uma estimativa do transporte necessário para condução dos resíduos ao local de valorização, não representa impactos significativos quando comparado com a fase de pré-fabricação.

Os resultados da análise de sensibilidade efectuada estão resumidos na Tabela 5.8. As variações obtidas são pouco expressivas, porque cada um dos parâmetros, individualmente, corresponde a uma pequena fracção do Ciclo de Vida no seu todo.

**Tabela 5.8 - Resultados obtidos na análise de sensibilidade efectuada, expressos em variação percentual relativamente à versão-base V1 (%)**

<b>Categorias de Impacto</b>	<b>V2</b>	<b>V3</b>	<b>V4</b>	<b>V5</b>	<b>V6</b>
Abiotic Depletion (ADP)	-0,14%	-0,55%	0,00%	0,10%	-0,72%
Acidification Potential (AP)	0,01%	-0,18%	0,00%	0,04%	-0,35%
Eutrophication Potential (EP)	-0,02%	-0,30%	0,00%	2,34%	-0,51%
Global Warming Potential (GWP 100 years)	0,04%	0,20%	0,00%	-0,61%	0,26%
Ozone Layer Depletion Potential (ODP, steady state)	-0,56%	-0,05%	-0,01%	0,36%	-0,06%
Photochem. Ozone Creation Potential (POCP)	0,03%	-0,21%	0,00%	0,31%	-0,37%

Comparando os resultados da análise de sensibilidade efectuada, pode concluir-se que a variação que produz um decréscimo mais acentuado dos impactos ambientais é a eliminação das necessidades de transporte. A eliminação, isolada, do transporte da casa pré-fabricada da fábrica até ao local da construção (V3), por si só produz resultados importantes.

No entanto, se, à remoção do transporte da casa entre Portugal e França, se juntar a hipótese algo irrealista da eliminação adicional das necessidades de transporte associadas ao fornecimento de todos os materiais (V6), na perspectiva virtual de que todos os materiais utilizados fossem de origem local, os resultados são consensualmente favoráveis para todos os indicadores. De facto, é claro que o facto de elevadas quantidades de materiais provirem de locais distantes como o Canadá ou o Norte da Europa, representa maiores impactos ambientais do que a utilização de matérias-primas disponíveis localmente. Este facto justifica que se recentre o foco da construção na recuperação de técnicas tradicionais, que necessariamente (por falta de alternativas, no passado) se servem de materiais disponíveis localmente, com vantagens no desenvolvimento da economia local, e simultaneamente redução de custos efetivos e impactos ambientais, acrescidos de vantagens claras a nível social.

A remoção do processo de reciclagem do ciclo de vida da habitação (V5) produz um aumento dos impactos ambientais para a totalidade dos indicadores analisados. No entanto, a diferença de resultados entre a V1 e a V4 é pouco significativa. A diferença entre estas duas últimas versões, reside no esforço adicional de reciclagem de mais 20% dos produtos de aço, madeira e PVC existentes no fim-de-vida do edifício, passando o valor médio de valorização de 80% para 100%, o que pode, em muitas situações, não ser uma perspectiva realista. Os resultados da análise de sensibilidade indicam que, no conjunto da vida do edifício, esta diferença não é significativa.

De acordo com a observação dos resultados em forma gráfica, para o indicador “Esgotamento Abiótico” (Figura 5.11), pode concluir-se que a variação que produz o maior decréscimo deste indicador é a eliminação da totalidade das necessidades de transporte (V6). É ainda de notar que a eliminação do processo de reciclagem (V5) aumenta o “Potencial de Esgotamento Abiótico”.

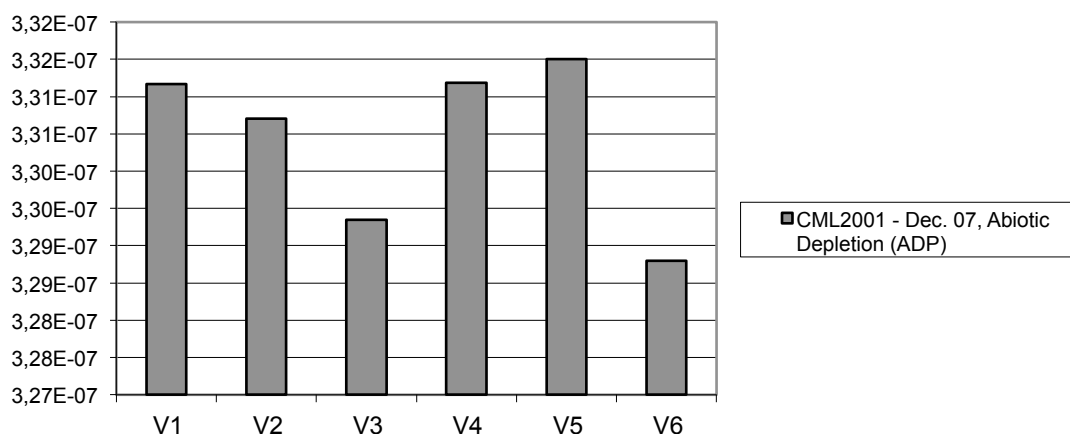


Figura 5.11 - Resumo dos resultados relativos à categoria de impacto "Esgotamento Abiótico", para as 6 versões analisadas (kg Sb-Equiv.)

O “Potencial de Acidificação” (Figura 5.12) apenas sofre uma variação significativa no cenário em que o transporte de elevadas quantidades de materiais é suprimido (V6). Para todos os outros cenários estudados, os valores relativos a esta categoria de impacto mantêm-se relativamente próximos.

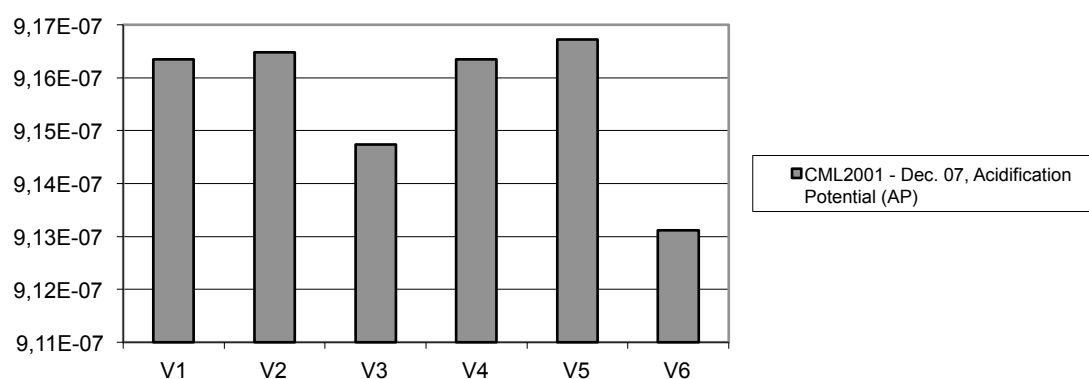


Figura 5.12 - Resumo dos resultados relativos à categoria de impacto "Potencial de Acidificação", para as 6 versões consideradas (kg SO<sub>2</sub>-Equiv.)

No conjunto do ciclo de vida do edifício em estudo, o “Potencial de Eutrofização” parece estar estreitamente relacionado com a deposição de resíduos em aterro (V5). Este fenómeno poderá dever-se à libertação de gases nocivos, resultado do processo de decomposição dos vários materiais em aterro. Para todos os outros cenários estudados, as diferenças de resultados relativas a esta categoria de impacto são pouco significativas.

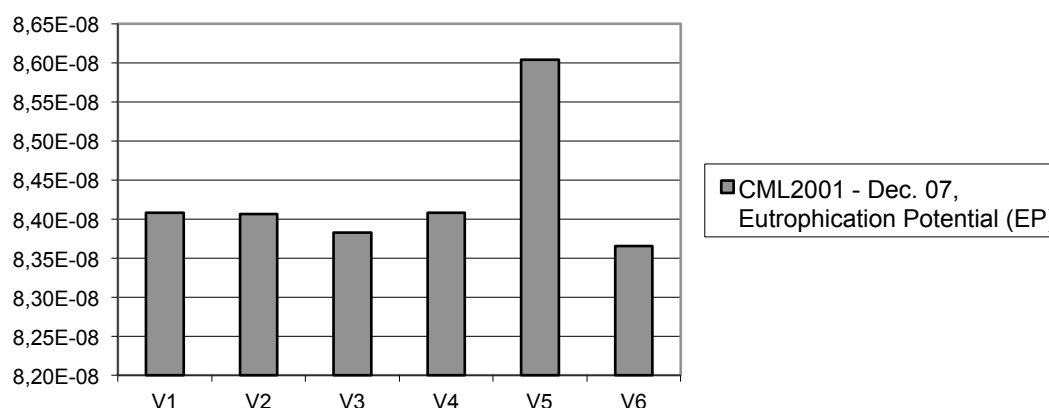


Figura 5.13 - Resumo dos resultados relativos à Categoria de Impacto "Potencial de Eutrofização", para as 6 versões consideradas (kg Phosphate-Equiv.)

É um padrão entre todas as versões estudadas, que o “Potencial de Aquecimento Global” se traduz em valores negativos. Isto deve-se à capacidade que a madeira tem de armazenar carbono nos seus tecidos, o que pode resultar num balanço negativo de carbono para o conjunto do ciclo de vida dos produtos de madeira (Perez-Garcia et al., 2005). De forma a ser possível retirar o máximo proveito desta característica da madeira, deverá ser dada especial atenção ao processo de florestação. A taxa de absorção de dióxido de carbono varia ao longo do período de crescimento das árvores, sendo particularmente relevante no período compreendido entre os 20 e os 100 anos de idade da árvore (Lippke et al., 2010). Por essa razão, deverão ser implementadas políticas de gestão florestal que obriguem ao cumprimento de determinadas regras que garantam que os produtos de madeira tiram partido da acumulação de quantidades significativas de CO<sub>2</sub>, ou seja, permitindo o abate apenas para árvores com idade próxima dos 100 anos. Por outro lado, a partir dos 100 anos de idade o incremento de dióxido de carbono absorvido adicionalmente pela árvore, em cada ano de vida, é pouco significativo. Na perspectiva de potenciação do armazenamento de dióxido de carbono em madeira e produtos de madeira, é vantajoso que a árvore centenária seja abatida e imobilizada em produtos com um período de vida útil alargado, de forma a libertar espaço na floresta para o crescimento de uma nova árvore.

No cenário V5, as vantagens do armazenamento de carbono são parcialmente anuladas, devido aos impactos causados pelo cenário de fim-de-vida definido, que corresponde à deposição de uma elevada quantidade de materiais em aterro. Mesmo assim, o Potencial de Aquecimento Global traduz-se em valores negativos para esta versão estudada, o que significa que as vantagens objectivas de armazenamento de CO<sub>2</sub> pela madeira contida no edifício compensam e superam os impactos relativos a este indicador, mesmo colocando a hipótese de não se efetuar nenhum processo de reciclagem.

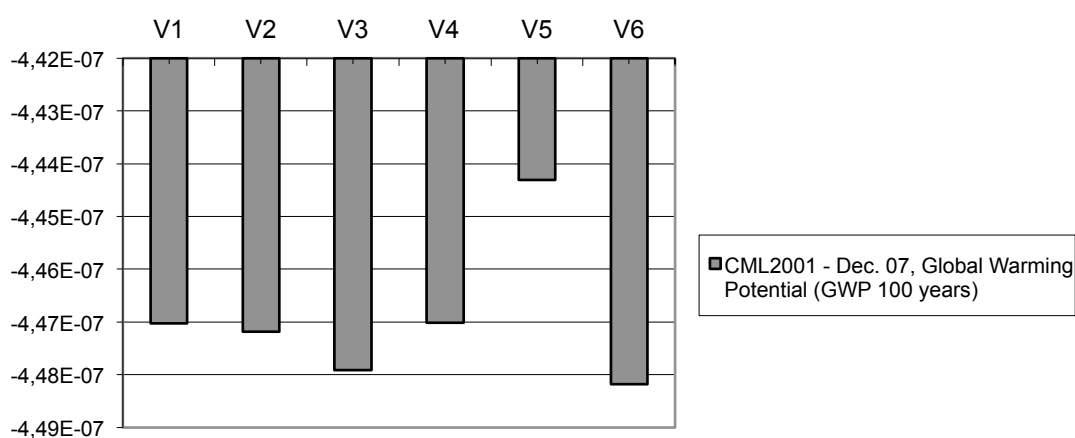


Figura 5.14 - Resumo dos resultados relativos à Categoria de Impacto "Potencial de Aquecimento Global (100 anos)" para as 6 versões consideradas (kg CO<sub>2</sub>-Equiv.)

A destruição da camada de ozono assume-se como uma ameaça mais significativa na V5, em que se dispensa qualquer processo de reciclagem. Pelo contrário, os menores impactos relativos a este indicador verificam-se na V2, em que se utilizam painéis de contraplacado, em substituição dos painéis de OSB considerados na versão-base. A produção de painéis de contraplacado consome menores quantidades de energia, quando comparada com a produção de painéis OSB (Lippke et al., 2010). Os resultados desta ACV indicam clara vantagem para os painéis de contraplacado apenas no que respeita a este indicador (ODP steady state), não apresentando diferenças significativas para as restantes categorias de impacto.

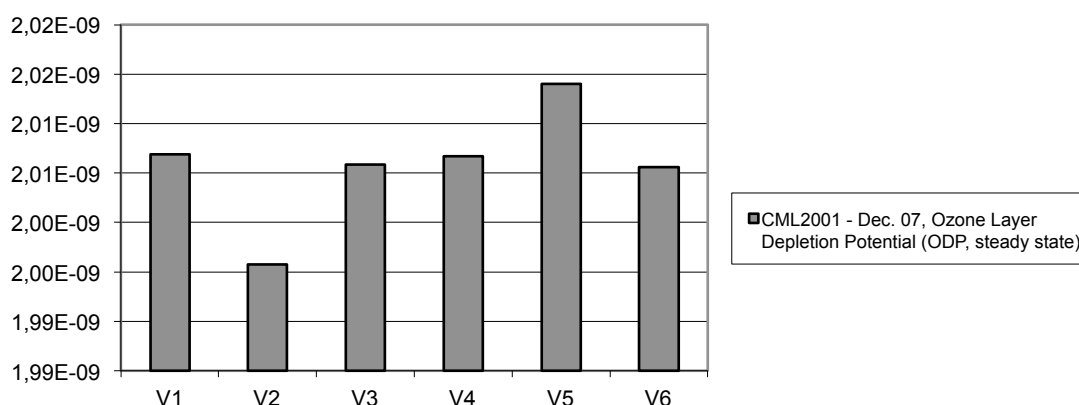


Figura 5.15 - Resumo dos resultados relativos à categoria de impacto "Destruição da Camada de Ozono", para as 6 versões consideradas (kg R11-Equiv.)

O "Potencial de Criação Fotoquímica de Ozono" verifica os valores mais elevados para a V5 (0% reciclagem) e os valores mais reduzidos para a V6 (sem transporte). A V3, em que se dispensa o transporte da casa pré-fabricada, de Portugal para França, apresenta valores reduzidos relativamente a esta categoria de impacto, quando comparados com a versão-base.

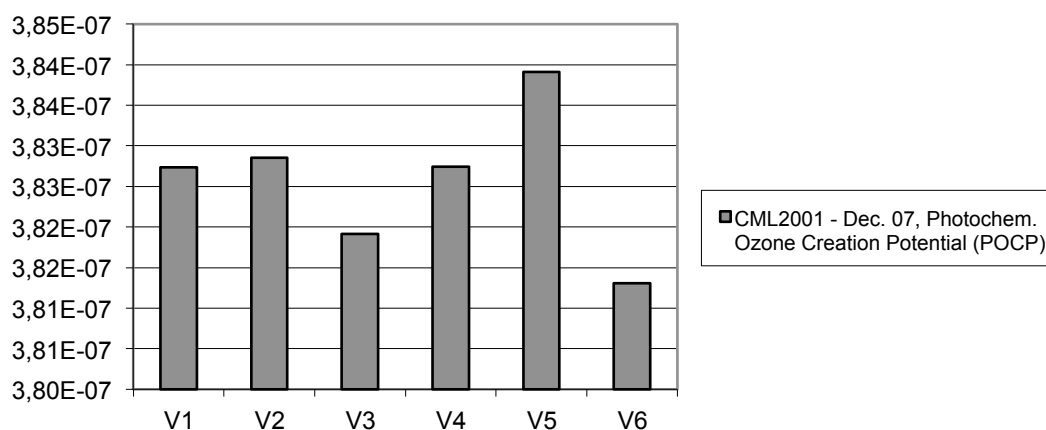


Figura 5.16 - Resumo dos resultados relativos à categoria de impacto "Potencial de Criação Fotoquímica de Ozono", para as 6 versões consideradas (kg Ethene-Equiv.)



## 5.5 Discussão de resultados

Os resultados do presente ACV indicam que o uso de contraplacado, em vez de OSB, representa um decréscimo geral dos impactos ambientais, com especial incidência nas categorias “Potencial de Destruição da Camada de Ozono” e “Esgotamento Abiótico”. Um resultado semelhante foi obtido por Lippke et al. (2010), que aponta uma redução de cerca de 30% das emissões de carbono, quando é utilizado contraplacado (valores médios para a produção no NW dos E.U.A) em substituição de OSB (valores médios para a produção no SE dos E.U.A.), para um determinado caso de estudo.

Especialmente no que respeita ao indicador “Destruição da Camada de Ozono” (ODP), a ACV em curso indica uma significativa vantagem no uso de contraplacado em detrimento de OSB. Para este indicador, e de acordo com os valores normalizados representados sob a forma de gráfico-radar na Figura 5.17, a substituição dos painéis de OSB por contraplacado produzem resultados inclusive mais significativos do que a eliminação integral das necessidades de transporte.

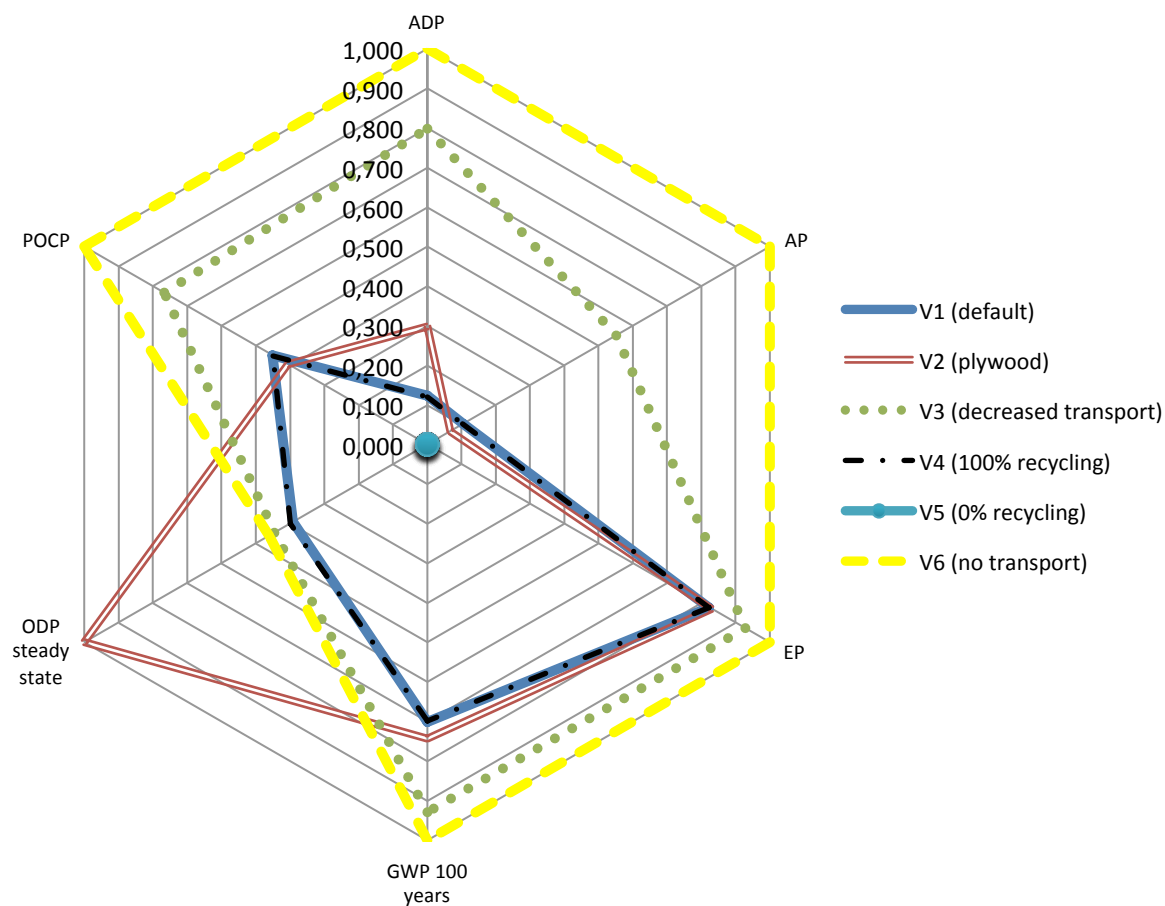


Figura 5.17 - Normalização dos resultados das 6 versões analisadas

Relativamente às restantes categorias de impacto, é consensual a vantagem da versão 6, em que foi eliminado todo o transporte incluído na modelação.

Por outro lado, é consensual relativamente a todas as categorias de impacto analisadas, que a versão que representa os maiores impactos ambientais é a V5, em que se eliminou todo e qualquer processo de reciclagem, considerando a integral deposição dos resíduos de demolição do edifício em aterro.

## 6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

A prossecução do trabalho apresentado permitiu levantar novas questões relativas à sustentabilidade do uso da madeira em construção. Em primeiro lugar, apresenta-se uma reflexão sobre os fatores a considerar na avaliação da sustentabilidade de edifícios de madeira; em segundo lugar, apresentam-se considerações de âmbito geral e recomendações para futuros trabalhos de investigação dentro da mesma temática.

### 6.1 Fatores a considerar na avaliação da sustentabilidade de edifícios de madeira

Da análise dos dois casos de estudo atrás apresentados, complementados pela revisão do Estado da Arte que os antecedeu, podem determinar-se três linhas fundamentais de discussão como contributo para o maior rigor na aplicação de metodologias de avaliação da sustentabilidade a edifícios de madeira.

#### 6.1.1 Armazenamento de Dióxido de Carbono

A primeira, que é aliás um dos assuntos da “ordem do dia” na comunidade científica que se foca em torno dos problemas da Sustentabilidade aplicados à generalidade dos produtos de madeira, prende-se com a quantificação dos impactos relacionados com o armazenamento de dióxido de carbono nos tecidos da madeira. As duas bases de dados utilizadas neste estudo mostraram diferentes resultados para o “Potencial de Aquecimento Global” da madeira inclusa em cada um dos casos de estudo: o primeiro caso, em que os impactos foram quantificados com a ajuda do software *BEES* (que, por sua vez, apresenta resultados de ACV previamente calculados no software *SimaPro*), apresentou resultados positivos para esta categoria de impacto, apesar de, conforme descrito no manual de utilizador do *BEES*, a sua base de dados considerar o armazenamento de CO<sub>2</sub> nos tecidos da madeira. O *BEES* serve-se de uma base de dados fechada, permitindo ao utilizador aceder à descrição dos processos quantificados no cálculo dos impactos de cada um dos produtos finais apresentados, mas não aos impactos relativos de cada um desses processos. Por essa razão, a atribuição de valores positivos ao “Potencial de Aquecimento Global” dos produtos de madeira poderá estar relacionada com o transporte envolvido no processo de produção do material, a energia despendida nas várias operações (desde o abate da árvore até ao processamento da madeira em fábrica), entre outros processos incluídos na quantificação final apresentada.

Por outro lado, os resultados do segundo caso de estudo, em que foi utilizado o software *GaBi 4* (PE International, 2007), com a sua base de dados incorporada para estudantes, apresentou resultados negativos para a mesma categoria de impacto. Neste caso, o software utilizado permite a modelação de todas as variáveis, pelo que é possível afirmar com segurança que a base de dados utilizada (neste caso, o *EcoInvent*) atribui valores negativos ao “Potencial de Aquecimento Global” da madeira. Na ACV realizada, mesmo nas versões que incluem elevadas distâncias de transporte, a globalidade do ciclo-de-vida do edifício continua a apresentar valores negativos no que respeita à categoria de impacto GWP, o que significa que a capacidade de armazenamento de CO<sub>2</sub> da madeira compensa as emissões dos restantes processos quantificados.

Este assunto é amplamente discutido em Garcia & Freire (2012), que refere um valor de 0 (zero) para o “Potencial de Aquecimento Global” resultante da emissão de CO<sub>2</sub> biogénico, que é o caso do CO<sub>2</sub> libertado aquando da decomposição da madeira. A assunção deste valor deve-se à consideração de que as emissões de CO<sub>2</sub> deste tipo de produtos são compensadas pelo crescimento florestal, pelo que o impacto global relativo a este indicador é neutro. No entanto, esta é apenas uma das abordagens possíveis para o “problema” da quantificação do ciclo de carbono associado aos produtos de madeira.

A quantidade de dióxido de carbono presente nos tecidos da madeira, e a forma de a quantificar estão estreitamente relacionadas, entre outros aspectos, com a gestão florestal. De facto, a idade da árvore no momento do corte é determinante para que se assuma claramente, ou não, o armazenamento ativo de CO<sub>2</sub> nos produtos de madeira. Isto leva-nos à segunda grande questão que merece ser discutida: a amplitude das fronteiras do sistema.

### **6.1.2 Fronteiras do sistema**

As ditas “fronteiras físicas” de um sistema para prossecução de ACV são relativamente fáceis de delimitar, no sentido em que se referem ao âmbito da avaliação, determinando se estamos a avaliar um simples material de construção, a agregação de vários materiais num elemento construtivo mais complexo, o conjunto de um edifício, um quarteirão, uma cidade ou mesmo uma região geográfica. Ou seja, a fronteira física refere-se à unidade funcional definida, o que não constitui um problema particular dos edifícios de madeira, mas, pelo contrário, é comum a todos os tipos de avaliação.

Relativamente ao uso da madeira em construção, a extensão “física” da análise pode determinar se estará a ser incluída a floresta, com todos os impactos positivos e negativos da exploração florestal. É necessário que fique bem delimitado no início da ACV quais são as fronteiras a considerar, adaptando-as aos objectivos e recursos da análise. É necessário ter em conta que, quanto mais dilatadas as fronteiras do sistema, mais tempo será necessário para correta elaboração do inventário, o que poderá comprometer a viabilidade ou utilidade da avaliação.

Contudo, as “fronteiras temporais” representam um desafio bem mais significativo. Logo na fase de florestação, um estudo exaustivo poderá deparar-se com a larga escala temporal envolvida no processo de crescimento das árvores e nos ciclos florestais, ao que se junta a complexidade de alocação dos impactos da atividade florestal a produtos e funções diversas, de entre as quais se contam o suporte da biodiversidade e todos os coprodutos que se podem retirar de uma floresta, ou mesmo de uma árvore (Perez-Garcia et al., 2005).

A “normalização” de uma metodologia para este tipo de edifícios, de forma a tornar possível a comparação entre várias soluções, deveria contemplar a definição de fronteiras do sistema que fossem amplamente aceites pela comunidade de utilizadores. Desta forma, tornar-se-ia a análise menos dependente do sujeito que a conduz, levando à produção de resultados mais generalizáveis.

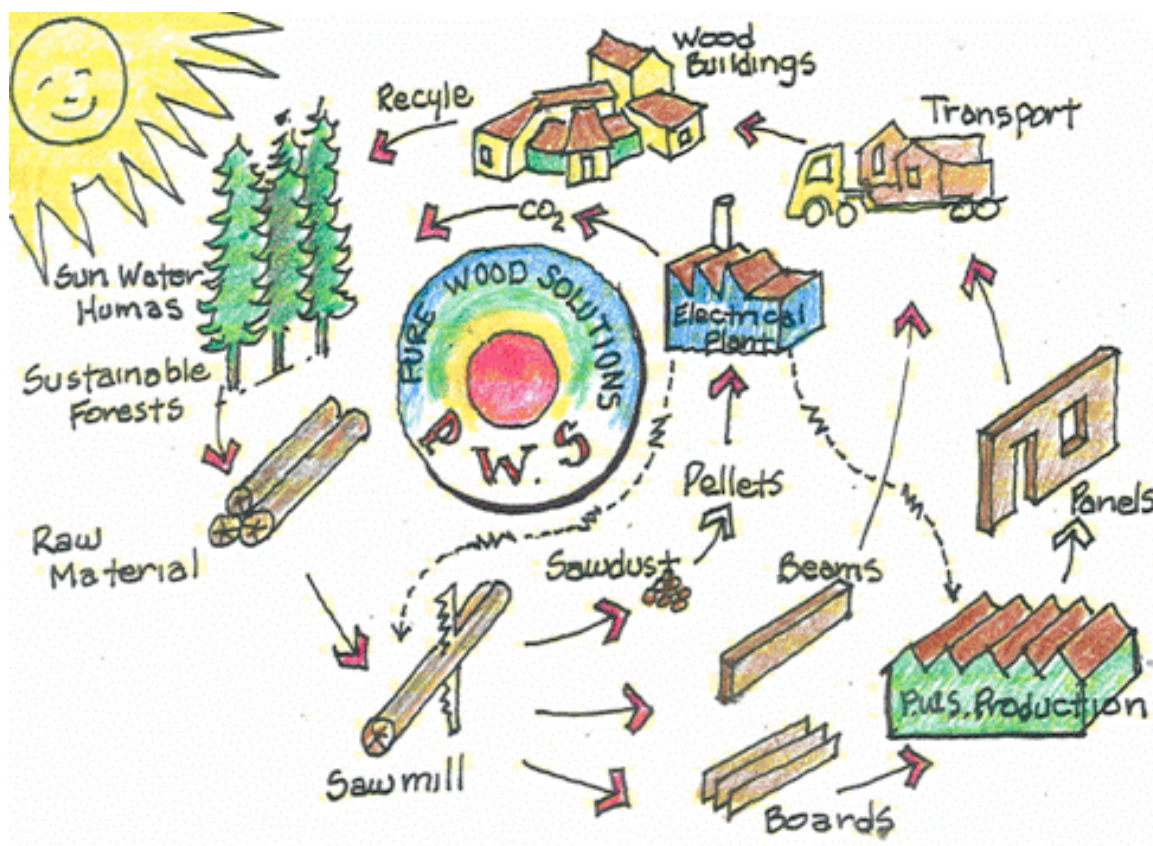


Figura 6.1 - Ciclo de Vida da madeira em construção (fonte: [www.purewoodsolutions.com](http://www.purewoodsolutions.com))

### 6.1.3 Dimensão Social da Sustentabilidade

A terceira linha de discussão foca-se na sub-explorada dimensão social. Verifica-se uma forte tendência atual para valorização e aprofundamento da dimensão social da sustentabilidade, que tem sido, de certa forma, relegada para segundo plano na generalidade dos estudos efectuados até à data. A construção em madeira oferece um amplo campo de investigação relativo aos impactos sociais, como por exemplo: a promoção das economias locais, nomeadamente em áreas vítimas de desertificação, que poderiam ser dinamizadas através da exploração florestal sustentada; a possibilidade de autoconstrução assegurada pela utilização de elementos modulares e ligações mecânicas; a promoção da segurança e satisfação dos intervenientes em fase de obra, que têm oportunidade de trabalhar um material com escala humana, entre outras que merecem ser exploradas.

Uma futura metodologia adaptada às particularidades deste tipo de edifícios, terá necessariamente que conter indicadores sociais. Esta tendência confirma-se pela publicação de normas recentes, tais como a EN 15643-3:2012, que refere, entre outros, os seguintes indicadores específicos para avaliação do impacto social na fase de construção:

- A Saúde e o Conforto dos utilizadores e dos intervenientes na construção. Este indicador poderá incluir informação relativa ao comportamento térmico do edifício, humidade, qualidade da água disponível, qualidade do ar interior, desempenho acústico e conforto visual;
- A Acessibilidade, que contempla aspectos relacionados com a circulação e utilização por indivíduos com mobilidade reduzida;
- A Manutenção, que inclui considerações sobre as necessidades de manutenção ao longo da fase de utilização;
- A Segurança, que se traduz em sub-indicadores tais como a resistência às alterações climáticas, segurança em caso de incêndio, segurança contra intrusão e vandalismo, ou ainda segurança em caso de falhas no fornecimento de eletricidade, água, aquecimento comunitário, ou outros;
- Impactos na vizinhança, tais como ruídos, emissões poluentes, ou mesmo reflexos da luz solar;
- Choques e vibrações que possam causar incómodos na vizinhança.

### 6.1.4 Síntese

As categorias para avaliação da sustentabilidade que devem ser tidas em conta na formulação de uma metodologia de ACV adaptada a edifícios de madeira são resumidas na Tabela 6.1.

**Tabela 6.1 – Resumo das Categorias a considerar para Avaliação da Sustentabilidade de Edifícios de Madeira**

<b>AMBIENTAL</b>	<p>Correta quantificação e valorização da capacidade de armazenamento de carbono</p> <p>Promoção da qualidade do ar interior</p> <p>Facilidade de reciclagem em novos produtos</p> <p>Único material de construção que pode ser usado como combustível para produção de energia.</p>
<b>SOCIAL</b>	<p>Impactos da indústria florestal nas economias locais</p> <p>Permite a autoconstrução</p> <p>A modularidade e baixo peso estrutural podem permitir a deslocação do edifício, adaptando-se à necessidade de mobilidade dos utilizadores.</p>
<b>ECONÓMICA</b>	<p>A modularidade permite a construção faseada, adaptando-se à disponibilidade económica dos utilizadores.</p> <p>A utilização de ligações mecânicas e de elementos com dimensões relativamente reduzidas permite a substituição pontual de elementos degradados, aligeirando o peso económico da fase de manutenção.</p>

## 6.2 Conclusões

Contextualizado no objectivo geral do aumento da sustentabilidade da construção, o presente trabalho conclui com as seguintes indicações: cuidada e informada seleção de materiais em fase de projeto (ultrapassada que está a questão da eficiência energética); incentivos dos processos de pré-fabricação, reutilização e reciclagem; promover a agilização do aplicação de ferramentas ACV em fase de projeto, nomeadamente através na sua inclusão em ferramentas BIM, que permitem uma simulação do edifício bastante próxima da realidade, facilitando quer os processos de quantificação de inventário, quer a aferição do desempenho térmico dos edifícios.

Na discussão da problemática geral da sustentabilidade do uso da madeira na construção, destaca-se a possibilidade de atribuir valores negativos ao “Potencial de Aquecimento Global” para este material de construção. A generalização indiscriminada deste conceito poderá ser interpretada de forma a julgar-se razoável a construção de edifícios de madeira com o objectivo direto de travar o aquecimento global, o que poderá ter efeitos perversos. O aumento da construção em madeira, com conseqüente aumento da quantidade de CO<sub>2</sub> imobilizado por várias décadas, pode revelar-se atrativo numa perspectiva “imediate”, mas não deverá perder-se de vista o facto de que a construção de qualquer edifício representa outras ameaças ambientais, que não poderão ser totalmente compensadas pela “função” dos edifícios enquanto reservatórios de carbono.

Do ponto de vista ambiental, será vantajoso substituir produtos de construção correntemente utilizados no nosso país, muitos deles com elevadas quantidades de energia incorporada (em particular, o betão), por produtos de madeira. Mas, provavelmente, não será vantajoso construir edifícios de madeira apenas com o objectivo de “retirar” árvores da floresta, dando lugar ao crescimento de novas árvores.

A discussão lançada pelos vários pontos de vista expressos na bibliografia revista depende em muito da clarificação do papel da madeira como dispositivo de armazenamento de CO<sub>2</sub>. Por essa razão, é necessário empreender um trabalho de pesquisa mais vasto neste domínio, de forma a obter um consenso razoável sobre a forma de quantificação desta propriedade da madeira na prossecução da análise de ciclo de vida.

Outro assunto atual, de acordo com o que ficou patente ao longo da dissertação apresentada, refere-se à consideração de aspectos sociais na avaliação da sustentabilidade. Este é um aspecto que tem sido alvo de desenvolvimentos recentes, pelo que carece de especial atenção.



### 6.3 Recomendações para trabalhos futuros

Os futuros trabalhos que venham a desenvolver-se dentro do mesmo âmbito da dissertação que se apresenta, deverão partir dos problemas identificados na aplicação de metodologias de ACV ao caso concreto dos edifícios de madeira (ver Capítulo 6), para clarificação dos aspectos que geraram as questões mais relevantes, e poderão constituir barreiras ao sucesso da avaliação.

Neste sentido, recomenda-se o acompanhamento dos avanços da discussão na comunidade científica, no que respeita ao controverso tema do “carbono biogénico” e da sua interpretação dentro do ciclo-de-vida da madeira. A consolidação de um consenso sobre este tema é importante para a seleção crítica de bases de dados e sistemas de avaliação que permitam a quantificação “correta” deste parâmetro.

No que respeita a aspetos mais práticos, destinados à comunidade projetista, recomenda-se o desenvolvimento, divulgação e promoção de ferramentas de ACV para utilização desde as fases mais embrionárias do projeto, altura ideal para introduzir preocupações de sustentabilidade, com os resultados mais eficientes. Algumas das características a considerar nos projetos, com vista ao mesmo objectivo de promoção da sustentabilidade, prendem-se com a adopção de soluções pré-fabricadas com ligações mecânicas, favorecendo a separação dos materiais no fim-de-vida do edifício, o que permite a reutilização e reciclagem.



## 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 14040:2006, I. (2006). Environmental Management - Life cycle assessment - Principles and Framework. International Standardisation Organisation.
- EN 15643-3:2012, E. (2012). Sustainability of construction works - Sustainability assessment of buildings - Part 3: Framework for the assessment of social performance.
- Aye, L., Ngo, T., Crawford, R., Gammampila, R., & Mendis, P. (2012). Life cycle greenhouse gas emissions and energy analysis of prefabricated reusable building modules. *Energy and Buildings* (47), 159-168.
- Buchanan, A. H., & Levine, S. B. (1999). Wood based building materials and atmospheric carbon emissions. *Environmental Science & Policy* (2), 427-437.
- Borjesson, P., & Gustavsson, L. (2000). Greenhouse gas balances in building construction: wood versus concrete from life-cycle and forest land-use perspectives. *Energy Policy* (28), 575-588.
- Cuerda, I, & Neila, J. (2012). Which façade is better for the people? *BSA 2012 - 1st International Conference on Building Sustainability Assessment*. Porto: Green Lines Institute e Universidade do Minho.
- CIB & UNEP-IETC. (2002). *Agenda 21 for Sustainable Construction in Developing Countries*. Pretoria: CSIR Building and Construction Technology.
- Coelho, A., & Lopes, A. (2012). *Optimização do Ciclo de Vida de uma habitação unifamiliar com estrutura em Aço Leve*. Coimbra.
- Fernandes, J., & Mateus, R. (2012). Energy efficiency principles in Portuguese vernacular architecture. *BSA 2012 - 1st International Conference on Building Sustainability Assessment*. Porto: Green Lines Institute e Universidade do Minho.
- Finnveden, G., Hauschild, M. Z., Ekvall, T., Guinée, J., Heijungs, R., Hellweg, S., et al. (2009). Recent Developments in Life Cycle Assessment. *Journal of Environmental Management* (91), 1-21.
- GaBi 4 (2007) Software and data base for Life Cycle Engineering. PE International
- Garcia, R., & Freire, F. (2012). Environmental assessment of wood-based panels: a comparison of life-cycle-based tools. *BSA 2012 - International Conference on Building Sustainability Assessment* (pp. 596-604). Porto: Green Lines Institute e Universidade do Minho.
- Gervásio, H. M. (2010). *Sustainable Design and Integral Life-cycle analysis of bridges*. (U. d. Coimbra, Ed.) Coimbra: Departamento de Engenharia Civil.
- Joseph, P., & Tretsiakove-McNally, S. (2010). Sustainable Non-Metallic Building Materials. *Sustainability* (2), 400-427.
- Karjaleinen, T., Kellomaki, S., & Pussinen, A. (1994). Role of Wood-Based Products in Absorbing Atmospheric Carbon. *Silva Fennica* (28(2)), 67-80.
- Lenzen, M., & Lundie, S. (2002). Input -Output Model of the Australian Economy Based on Published 1996-97 Australian Input-Output Data.
- Lippiat, B. C. (2007). *BEES 4.0 - Building for Environmental and Economic Sustainability, Technical Manual and User Guide*. U.S.: National Institute of Standards and Technology.
- Lippke, B., Wilson, J., Meil, J., & Taylor, A. (2010). Characterizing the importance of carbon stored in wood products. *Wood and fiber science* (42 (Corrim Special Issue)), 5-14.
-

- Loh, E., Crosbie, T., Dawood, N., & Dean, J. (2010). A framework and decision support system to increase building life cycle energy performance. *Journal of Information Technology in Construction* (15), 337-353.
- Nassén, J., Hedenus, F., Karlsson, S., & Holmberg, J. (2012). Concrete vs. wood in buildings - An energy system approach. *Building and Environment* (51), 361-369.
- Marques, L. (2008). *O papel da madeira na sustentabilidade da construção*. (FEUP, Ed.) Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Especialização em Construções Cíveis.
- Mateus, R. (2009). *Avaliação da Sustentabilidade da Construção - Propostas para o Desenvolvimento de Edifícios mais Sustentáveis*. Guimarães: Tese de Doutoramento em Engenharia Civil / Processos de Construção.
- Mateus, R., & Bragança, L. (2006). *Tecnologias Construtivas para a Sustentabilidade da Construção*. Porto: Edições Ecopy.
- Perez-Garcia, Lippke, B., Briggs, D., Wilson, J. B., & Bowyer, J. a. (2005). The environmental performance of renewable building materials in the context of residential construction. *Wood and Fiber Science, Corrim Special Issue* (37), 3-17.
- Sanz-Calcedo, J.G., Luna, M. F., Soriano, R. C. (2012). Evaluation of the efficiency to use sustainable classical techniques on the modern construction. *BSA 2012 - 1st International Conference on Building Sustainability Assessment*. Porto: Green Lines Institute e Universidade do Minho.
- Silva, C. V., Branco, J. M., & Rodrigues, V. (2011). Alvenaria estrutural com elementos de madeira. *CIMAD 11 - 1º Congresso Ibero-Latino Americano da Madeira na Construção*. Coimbra.
- Shmulsk, R., & Jones, P. (2011). *Forest Products and Wood Science - An Introduction*. UK: Wiley-Blackwell.
- Rossi, B., Marique, A.-F., & Reiter, S. (2012). Life-cycle assessment of residential buildings in three different European locations, case study. *Building and Environment* (51), 402-407.
- Tam, V., & Tam, C. (2006). A review on the viable technology for construction waste recycling. *Resources, Conservation and Recycling* (47), 209-221.
- Thormark, C. (2001). Conservation of energy and natural resources by recycling building waste. *Resources, Conservation and Recycling* (33), 113-130.
- Thormark, C. (2006). The effect of material choice on the total energy need and recycling potential of a building. *Building and Environment* (41), 1019-1026.
- UNEP. (2003). *Life-cycle analysis of the built environment*. UNEP Industry and Environment.
- Wang, E., Shen, Z., & Berryman, C. (2011). A Building LCA Case Study Using Autodesk Ecotect and BIM Model. *47th ASC Annual International Conference Proceedings*. Lincoln: University of Nebraska.

**Websites consultados:**

Fairbank, Cooper & Lyle Ltd. [On line]. Disponível em <http://www.fcl-ltd.com> [consultado em 5/05/2012]

Stora Enso [On line]. Disponível em <http://www.storaenso.com> [consultado em 20/05/2012]

Modular System [On line]. Disponível em <http://www.modular-system.com> [consultado em 16/05/2012]

TTTower, DST Group [On line]. Disponível em <http://www.tttower.com> [consultado em 15/03/2012]

Home Design Inspiration [On line]. Disponível em <http://www.theluxhome.com> [consultado em 30/05/2012]

Wikipédia [On line]. Disponível em <http://pt.wikipedia.org> [consultado em 29/05/2012]

Via Michelin [On line]. Disponível em <http://www.viamichelin.com> [consultado em 5/01/2012]



## 8. ANEXOS