



AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA DE COBERTURAS VERDES DE TIPOLOGIA EXTENSIVA EM LISBOA

António Luís Ferreira Alves

Dissertação para a obtenção do Grau de Mestre em

Construção e Reabilitação

Orientadora: Professora Inês dos Santos Flores Barbosa Colen

Orientadora: Professora Maria Cristina de Oliveira Matos Silva

Júri

Presidente: Professor Pedro Manuel Gameiro Henriques

Orientadora: Professora Inês dos Santos Flores Barbosa Colen

Vogal: Professor José Dinis Silvestre

Novembro de 2015

RESUMO

O objectivo da dissertação consiste na avaliação ambiental de coberturas verdes de tipologia extensiva no ciclo de vida (*cradle to grave*). O desempenho ambiental (e energético) das componentes avaliadas depende da sua localização geográfica, assumindo-se estas integradas num edifício genérico em Lisboa, cidade de clima temperado com Verão quente e seco. Para alcançar o objetivo, foi aplicada a metodologia de Avaliação do Ciclo de Vida, utilizando a ferramenta *GaBi* numa abordagem comparativa simplificada - baseada num extenso corpo teórico - de dois sistemas de produtos existentes no mercado de coberturas planas: verde extensiva e convencional. Embora a ACV seja orientada para produtos, os resultados também são interpretados à escala urbana, a qual necessita de mais investigação. A esse nível, a Análise Energética do Ciclo de Vida demonstra que as coberturas verdes extensivas poderão apresentar um consumo energético inferior ao das coberturas convencionais, devido ao efeito indireto da redução da Ilha de Calor Urbana. Ao nível de produto e no cenário considerado, os resultados da Avaliação de Impacte do Ciclo de Vida demonstram que o potencial de aquecimento global (*GWP 100 years*) da cobertura verde extensiva tem um impacto positivo, explicado pelo sequestro de CO₂ produzido pela camada vegetal ao longo da sua vida útil (90 anos). As coberturas extensivas são produtos sustentáveis no longo prazo, mas é necessária mais investigação na área dos materiais constituintes das suas camadas funcionais (camada de forma, membrana de impermeabilização, isolamento térmico e camada drenante), tendo como objetivo a melhoria do desempenho ambiental.

Palavras – chave: Avaliação do Ciclo de Vida, Coberturas Verdes, GaBi, Reabilitação de Edifícios, Lisboa.

ABSTRACT

The objective of this work is the environmental assessment of extensive green roofs in the life cycle (cradle to grave). The environmental (and energetic) performance of the evaluated components depends on their geographical location, assuming they are integrated into a generic building in Lisbon, temperate city with hot, dry summer. To achieve the goal, it was applied the methodology of Life Cycle Assessment, using the *GaBi* tool in a simplified comparative approach - based on extensive theoretic body - of two existing product systems in the flat roofs market: extensive green roof and conventional roof. Although LCA is oriented to products, the results are also interpreted on an urban scale, which needs more research. At that level, the Life Cycle Energy Analysis shows that extensive green roofs may have energy consumption lower than those of conventional roofs due to the indirect effect of reducing the Urban Heat Island. At the product level and considering the adopted scenario, the results of the Life Cycle Impact Assessment show that the global warming potential (GWP 100 years) of the extensive green roof has a positive impact, explained by the CO₂ sequestration produced by the vegetation layer along their lifetime (90 years). Extensive roofs are sustainable products in the long term, but more research is needed in the area of the constituent materials of their functional layers (shape layer, waterproofing membrane, insulation and drainage layer), in order to improve environmental performance.

Keywords: Life Cycle Assessment, Green Roofs, GaBi, Building Rehabilitation, Lisbon

AGRADECIMENTOS

A realização desta dissertação representou um desafio e correspondeu à concretização de uma etapa importante no meu percurso académico e profissional. O resultado foi fruto do contributo de algumas pessoas às quais expresso os meus sinceros agradecimentos.

Em particular, gostaria de agradecer à Professora Inês Flores-Colen e à Professora Cristina Matos Silva, minhas orientadoras científicas, pela disponibilidade, incentivo e crítica construtiva envolvidos neste trabalho. Ao Professor José Dinis Silvestre pela atenção e contributos.

Ao Engenheiro Jorge Pombo pela imprescindível colaboração que facilitou o acesso às soluções e processos construtivos da Imperial adotados neste estudo..

Um agradecimento muito especial aos meus pais, à minha mulher e à minha filha. A sua compreensão e o seu apoio incondicional foram essenciais para a frequência do Mestrado em Construção e Reabilitação, no qual a realização da presente dissertação se integra.

ÍNDICE GERAL

RESUMO.....	i
ABSTRACT	iii
AGRADECIMENTOS	v
ÍNDICE GERAL	vii
ÍNDICE DE FIGURAS	xi
ÍNDICE DE TABELAS	xiii
1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1. OBJETIVO E MOTIVAÇÃO DA DISSERTAÇÃO	1
1.2. METODOLOGIA.....	1
1.3. ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO	2
2. ESTADO DA ARTE	3
2.1. CONSIDERAÇÕES GERAIS	3
2.2. ENQUADRAMENTO HISTÓRICO DA ACV: DA CONCEPÇÃO À SUSTENTABILIDADE.....	3
2.2.1. 1970-1990: décadas de concepção.....	3
2.2.2. 1990-2000: década de normalização	3
2.2.3. 2000-2010: década de elaboração	4
2.2.4. 2010-2020: década da Sustentabilidade do Ciclo de Vida (LCSA)	4
2.3. METODOLOGIAS DE ACV	6
2.3.1. Definição de ACV	6
2.3.2. ACV na indústria da construção de edifícios: 5 desafios metodológicos	7
2.4. ACV NA INDÚSTRIA DA CONSTRUÇÃO DE EDIFÍCIOS	9
2.4.1. ACV (BMCC) versus ACV (WPC).....	9
2.4.2. ACV de edifícios	10
2.4.3. ACV de materiais de construção e componentes de edifícios	13
2.4.3.1. ACV de coberturas verdes extensivas.....	16
2.4.4. Ferramentas de ACV	20
2.4.4.1. Sistema de classificação ATHENA.....	20
2.4.4.2. Sistema de classificação IEA Annex 31	23
2.5. NORMALIZAÇÃO E LEGISLAÇÃO.....	24
2.6. ANÁLISE CRÍTICA	26
2.6.1. Objeto de análise (dimensão vertical).....	26
2.6.2. Âmbito dos indicadores (dimensão horizontal)	27
2.6.3. Escolha das ferramentas	28
2.7. RESUMO (COBERTURAS VERDES DE TIPOLOGIA EXTENSIVA)	29
2.7.1. Definição e tipologias.....	29
2.7.2. Custos e benefícios	30

2.7.3. Definição de objetivos em fase de projeto	31
2.7.4. Solução construtiva (camadas funcionais)	31
2.7.5. Exigências funcionais	32
2.7.6. Normalização e legislação de coberturas verdes	33
3. METODOLOGIA	35
3.1. DEFINIÇÃO DO OBJETIVO E ÂMBITO	36
3.1.1. Definição do objetivo	36
3.1.1.1. Aplicação prevista do estudo de ACV	36
3.1.1.2. Propósito da ACV	38
3.1.1.3. Público-alvo da ACV	38
3.1.1.4. Utilização da análise comparativa	38
3.1.2. Definição do âmbito	38
3.1.2.1. Função do produto	39
3.1.2.2. Unidade funcional e fluxo de referência	41
3.1.2.3. Fronteiras do sistema	43
3.1.2.4. Nível de detalhe	48
3.1.2.5. Procedimentos de alocação e expansão do sistema	50
3.1.2.6. Requisitos de qualidade de dados	50
3.2. ANÁLISE DO INVENTÁRIO DE CICLO DE VIDA (LCI)	50
3.2.1. Recolha de dados	51
3.2.2. Cálculo do Inventário do Ciclo de Vida	51
3.3. AVALIAÇÃO DO IMPACTE DE CICLO DE VIDA (LCIA)	51
3.3.1. Métodos de avaliação de impacte	53
3.3.2. Seleção das categorias de impacte	55
3.3.3. Análise de Energia do Ciclo de Vida (LCEA): energia operacional	55
3.3.4. Elementos opcionais numa ACV	58
3.3.4.1. Normalização	58
3.3.4.2. Agrupamento	58
3.3.4.3. Ponderação	58
4. INTERPRETAÇÃO DE RESULTADOS	59
4.1. IDENTIFICAÇÃO DE QUESTÕES SIGNIFICATIVAS	59
4.1.1. Elementos do Inventário de Ciclo de Vida (LCI)	59
4.1.1.1. Recursos materiais	59
4.1.1.2. Resíduos	60
4.1.1.3. Emissões	61
4.1.1.4. Recursos energéticos	62
4.1.2. Indicadores das categorias de impacte	69
4.1.2.1. Cenário A	70

4.1.2.2. Cenário B.....	71
4.2. AVALIAÇÃO.....	77
4.2.1. Indicadores de qualidade de dados.....	78
4.2.2. Quantificação da incerteza.....	78
5. CONCLUSÕES FINAIS E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS.....	81
5.1. CONCLUSÕES GERAIS.....	81
5.2. CONCLUSÕES ESPECÍFICAS.....	81
5.3. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS.....	83
BIBLIOGRAFIA.....	85
A. ANEXOS.....	I
A1. Quadro-síntese de estudos de ACV (e <i>non LCA- based</i>) publicados e aplicados no sector da construção de edifícios em coberturas verdes extensivas.....	III
A2. Indicadores da Declaração Ambiental de Produto - Sistemas de Impermeabilização de Coberturas, com Membranas Betuminosas Totalmente Aderidas, (Imperialum, 2013).	V
A3. Resultados da LCIA: Diagramas GaBi: Cobertura verde extensiva (Indicadores das categorias de impacte - Análise de processos).	VII

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 - <i>Road map</i> para a LCSA. As duas ovas indicam as ISO-LCA e LCC (Zamagni et al, 2009)	5
Figura 2.2 - Histograma de estudos de ACV publicados e aplicados no sector da construção de edifícios (WPC - whole process of the construction: todo o processo de construção) [ordenadas: número de estudos].	11
Figura 2.3 - Histograma de estudos de ACV publicados e aplicados no sector da construção de edifícios (BMCC - building materials and component combinations: materiais de construção e combinações de componentes) [ordenadas: número de estudos].	14
Figura 2.4 - Cobertura verde extensiva sobre laje de betão armado (American Hydrotech, in http://www.wbdg.org/resources/greenroofs.php)	32
Figura 3.1 - Quadro metodológico da ACV (ISO 14040)	35
Figura 3.2 – Solução comercial de cobertura verde extensiva [3.7 Coberturas ajardinadas 3.7.1 Solução com isolamento térmico (sistema aderido) (Imperialum, 2015)	37
Figura 3.3 – Solução comercial de cobertura convencional [3.3 Coberturas de acessibilidade limitada 3.3.2. Solução com isolamento térmico (cobertura invertida) Imperialum] (Imperialum, 2015)	37
Figura 3.4 - Características do sistema construtivo comercial (camadas funcionais) (Decoverdi, 2015)	39
Figura 3.5 - Plano de processos: cobertura verde extensiva (PE Int'l, GaBi, 2014)	41
Figura 3.6 – Plano de processos: camada funcional da membrana de impermeabilização bicapa (<i>layer 6</i>) (PE Int'l, GaBi, 2014)	42
Figura 3.7 – Plano de processos: cobertura convencional (PE Int'l, GaBi, 2014)	42
Figura 3.8 - Esquema do Ciclo de Vida de um edifício (PE Int'l, GaBi, 2014)	44
Figura 3.9 – Fronteiras do sistema (PE Int'l, GaBi, 2014)	45
Figura 3.10 - Membrana de impermeabilização bicapa (Imperialum, 2013)	47
Figura 3.11 - Conversão de emissões para impactes potenciais <i>via</i> classificação e caracterização (PE Int'l, GaBi, 2014)	52
Figura 3.12 - Quadro conceptual para a definição de indicadores da categoria de impacte “Acidificação” (ligeiramente adaptado de: ISO 14042)	53
Figura 3.13 – Comparação das 2 soluções (cobertura verde extensiva vs cobertura branca convencional) (isolamento térmico XPS=6cm) para 3 casos de estudo, localizados em Lisboa	57
Figura 4.1 - Recursos energéticos no ciclo de vida da cobertura verde extensiva extensiva (PE Int'l, GaBi, 2014)	63
Figura 4.2 - Recursos energéticos no ciclo de vida da cobertura convencional (PE Int'l, GaBi, 2014)	63
Figura 4.3 - Recursos energéticos no ciclo de vida da cobertura verde extensiva (cenário B) (PE Int'l, GaBi, 2014)	64
Figura 4.4 - Recursos energéticos no ciclo de vida da cobertura convencional (cenário B) (PE Int'l, GaBi, 2014)	64
Figura 4.5 - EE (Energia Incorporada) das camadas funcionais (processos <i>GaBi</i>) que formam o sistema construtivo das coberturas.. Embodied Energy & Carbon Coefficients, Inventory of Carbon & Energy (ICE, 2011)	66
Figura 4.6 - Comparação cumulativa da energia operacional e da energia incorporada - cobertura verde extensiva	67
Figura 4.7 - Comparação cumulativa da energia operacional e da energia incorporada - cobertura convencional	67
Figura 4.8 - Peso (Kg) das camadas funcionais (processos <i>GaBi</i>) que formam o sistema construtivo das coberturas	68
Figura 4.9 - Condutibilidade térmica λ (W/m°C) das camadas funcionais (processos <i>Gabi</i>) que formam o sistema construtivo das coberturas	69
Figura 4.10 - Resistência térmica $R = esp/\lambda$ (m ² °C/W) das camadas funcionais	69
Figura 4.11- EC (Carbono Incorporado) das camadas funcionais (processos <i>GaBi</i>) que formam o sistema construtivo das coberturas..Embodied Energy & Carbon Coefficients, Inventory of Carbon & Energy (ICE, 2011)	70
Figura 4.12 - Comparação "verde extensiva" vs "convencional" (cenário A)	71
Figura 4.13 - Comparação "verde extensiva" vs "convencional" (cenário B)	72
Figura 4.14 - Evolução de <i>CML2001 - Nov. 2010, Global Warming Potential (GWP 100 years)</i> acumulado ao longo da vida útil da cobertura verde extensiva (90 anos)	74
Figura 4.15 - (<i>GWP 100 years</i>) [kg CO ₂ -Equiv.] em percentagens, plano <i>GaBi</i> “cobertura verde extensiva 1”, (PE Int'l, GaBi, 2014)	76
Figura A.1 - <i>CML2001 - Nov. 2010, Abiotic Depletion (ADP elements)</i> [kg Sb-Equiv.], cobertura verde extensiva. (PE Int'l, GaBi, 2014)	VII
Figura A.2 - <i>CML2001 - Nov. 2010, Abiotic Depletion (ADP fossil)</i> [MJ], cobertura verde extensiva (PE Int'l, GaBi, 2014)	VII

Figura A.3 - CML2001 - Nov. 2010, Acidification Potential (AP) [kg SO2-Equiv.] , cobertura verde extensiva, (PE Int'l, GaBi. 2014).	VIII
Figura A.4 - CML2001 - Nov. 2010, Eutrophication Potential (EP) [kg Phosphate-Equiv.], cobertura verde extensiva, (PE Int'l, GaBi. 2014).	VIII
Figura A.5 - - CML2001 - Nov. 2010, Global Warming Potential (GWP 100 years) [kg CO2-Equiv.], cobertura verde extensiva, (PE Int'l, GaBi. 2014).	IX
Figura A.6 - CML2001 - Nov. 2010, Ozone Layer Depletion Potential (ODP, steady state) [kg R11-Equiv.], cobertura verde extensiva, (PE Int'l, GaBi. 2014).	IX
Figura A.7 - CML2001 - Nov. 2010, Photochem. Ozone Creation Potential (POCP) [kg Ethene-Equiv.], cobertura verde extensiva,	X
Figura A.8 - CML2001 - Nov. 2010, Freshwater Aquatic Ecotoxicity Pot. (FAETP inf.) [kg DCB-Equiv.], cobertura verde extensiva, (PE Int'l, GaBi. 2014).	X
Figura A.9 - CML2001 - Nov. 2010, Marine Aquatic Ecotoxicity Pot. (MAETP inf.) [kg DCB-Equiv.], cobertura verde extensiva, (PE Int'l, GaBi. 2014).	XI

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1 - Definições de LCA (adaptado de Cabeza et al, 2014).....	7
Tabela 2.2 - Estudos de LCA (e <i>non LCA- based</i>) de coberturas verdes extensivas publicados e aplicados no sector da construção de edifícios.....	17
Tabela 2.3 – Média e máxima temperatura do ar interior. Necessidades de energia para aquecimento e arrefecimento em La Rouchelle para diferentes espessuras de isolamento térmico (adaptado de Jaffal et al, 2012 in Raposo, 2013).....	19
Tabela 2.4 - Média e máxima temperatura do ar interior. Necessidades de energia para aquecimento e arrefecimento em Atenas, La Rouchelle e Estocolmo (adaptado de Jaffal et al, 2012 in Raposo, 2013.....	19
Tabela 2.5 - Potencial para poupança energética de uma cobertura verde em coberturas sem isolamento, isolamento moderado e isolamento forte, em edifícios de escritórios em Atenas (Grécia), verificados por Nichaou et al. (2001); adaptado de Castleton et al. 2010 in Raposo, 2013).....	20
Tabela 2.6 - Sistema de classificação de 3 níveis para ferramentas relacionadas com ACV: “Assessment Tool Typology” designado posteriormente por classificação ATHENA, (adaptado de Trusty e Horst, 2005).....	21
Tabela 2.7 - Caracterização dos tipos de cobertura verde (adaptado de IGRA, 2013; Dunnett e Kingsbury, 2008; in Raposo, 2013).....	30
Tabela 2.8 - Benefícios/ desvantagens na avaliação de coberturas verdes extensivas (adaptado de Raposo, 2013).	31
Tabela 2.9 - Principais questões a ser abordadas na fase de projeto (adaptado de Raposo, 2013). 31	
Tabela 2.10 - Características das 7 camadas funcionais constituintes duma cobertura verde.	32
Tabela 2.11 - Exigências funcionais de coberturas verdes.	33
Tabela 3.1 – Nível de detalhe recomendado para 6 diferentes situações de decisão (Guinée et al, 2001).	39
Tabela 3.2 - Características do sistema construtivo comercial (camadas funcionais).	40
Tabela 3.3 – Árvore de fluxos - recursos (PE Int'l, GaBi, 2014).....	43
Tabela 3.4 – Módulos das etapas do ciclo de vida de acordo com a EN 15804, [UPSTREAM (verde) CORE (vermelho) DOWNSTREAM (laranja)],.....	44
Tabela 3.5 - Etapas do ciclo de vida de sistemas de impermeabilização com membranas betuminosas aplicados sobre coberturas planas - adotadas na ACV desta dissertação (Imperialum, 2013).....	46
Tabela 3.6 - Composição aproximada: das membranas betuminosas (Declaração Ambiental de Produto da Imperialum, 2013).	47
Tabela 3.7 - Nível de detalhe de todos os processos ACV criados com a ferramenta <i>GaBi</i> Erro! Indicador não definido.	
Tabela 3.8 - Métodos de caracterização ambiental disponíveis no <i>software GaBi</i> (PE Int'l, GaBi, 2014).	52
Tabela 3.9 – Método <i>CML 2001: Characterization factors: version 3.9 (November 2010)</i> (PE Int'l, GaBi, 2014).....	54
Tabela 3.10 - Comparação de 2 soluções (cobertura verde extensiva vs cobertura "branca" convencional), para 3 casos de estudo localizados em Lisboa (adaptado de Rocha e Silva, 2014).	56
Tabela 3.11 - Dados climáticos do edifício “projeto”.	57
Tabela 4.1 – Fluxos significativos <i>Gabi</i> da cobertura verde extensiva.	59
Tabela 4.2 - Recursos materiais (cobertura verde extensiva).....	60
Tabela 4.3 – Resíduos do ciclo de vida da cobertura verde extensiva.	60
Tabela 4.4 - Emissões do ciclo de vida da cobertura verde extensiva.	61
Tabela 4.5 - Consumos energéticos na fase de utilização do edifício (Nic e Nvc) das 2 soluções comparadas.	62
Tabela 4.6 – Recursos energéticos (MJ): comparação entre coberturas extensiva e convencional (cenário A).....	63
Tabela 4.7 – Recursos energéticos (MJ): comparação entre coberturas extensiva e convencional (cenário B).....	64
Tabela 4.8 - Embodied Energy & Carbon Coefficients, Inventory of Carbon & Energy (ICE, 2011).	65
Tabela 4.9 – Arvore de fluxos: <i>valuable substances – materials</i> (PE Int'l, GaBi. 2014).....	66
Tabela 4.10 - Comparação "verde extensiva" vs "convencional" (cenário A).....	71
Tabela 4.11 - Comparação "verde extensiva" vs "convencional" (cenário B).	72
Tabela 4.12 - Potencial de sequestro de carbono de coberturas verdes extensivas (adaptado de Getter et al, (2009)).	73
Tabela 4.13 – Evolução de <i>CML2001 - Nov. 2010, Global Warming Potential (GWP 100 years)</i> acumulado ao longo da vida útil da cobertura verde extensiva (90 anos).	74
Tabela 4.14 - Quadro-síntese dos indicadores de categoria de impacte <i>CML2001 - Nov. 2010</i> para as camadas funcionais da cobertura verde extensiva. (vermelho/verde representa impactes mais significativos, positivos/negativos).	77
Tabela A.1 - Quadro-síntese de estudos de ACV (e <i>non LCA- based</i>) publicados e aplicados no sector da construção de edifícios em coberturas verdes extensivas	III

Tabela A.2 - Indicadores ambientais,; Declaração Ambiental de Produto - Sistemas de Impermeabilização de Coberturas, com Membranas Betuminosas Totalmente Aderidas, (Imperialum, 2013).	V
Tabela A.3 - Indicadores de impacto ambiental da Declaração Ambiental de Produto - Sistemas de Impermeabilização de Coberturas, com Membranas Betuminosas Totalmente Aderidas, (Imperialum, 2013).	VI
Tabela A.4 - Indicadores de recursos da Declaração Ambiental de Produto - Sistemas de Impermeabilização de Coberturas, com Membranas Betuminosas Totalmente Aderidas, (Imperialum, 2013).	VI
Tabela A.5 - Indicadores de resíduos da Declaração Ambiental de Produto - Sistemas de Impermeabilização de Coberturas, com Membranas Betuminosas Totalmente Aderidas, (Imperialum, 2013).	VI

1. INTRODUÇÃO

1.1. OBJETIVO E MOTIVAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

O objectivo da presente dissertação consiste na avaliação ambiental de coberturas verdes de tipologia extensiva ao longo do seu ciclo de vida do berço ao portão (*cradle to gate*). O desempenho ambiental (e energético) das componentes avaliadas depende da sua localização geográfica. Por isso, assumiu-se que estas são parte integrante dum edifício genérico (não construído), localizado em Lisboa (Portugal). Os dados climáticos desse edifício “projeto” correspondem a um clima temperado com Verão quente e seco (Csa), segundo a classificação climática de *Köppen-Geiger*.

Para alcançar o objetivo anterior, foi aplicada a metodologia de Avaliação do Ciclo de Vida (LCA: *Life Cycle Assessment*) numa abordagem comparativa de duas diferentes soluções construtivas existentes no mercado de coberturas planas (de acesso limitado e com isolamento térmico), desempenhando as mesmas funções: cobertura verde extensiva e cobertura convencional. A unidade funcional utilizada corresponde a 1 m² de componente. O tempo de serviço estimado é de 90 anos, sendo equivalente ao definido na “Declaração Ambiental de Produto - Sistemas de Impermeabilização de Coberturas com Membranas Betuminosas Totalmente Aderidas” (Imperialum, 2013). Quanto ao nível de detalhe, trata-se de uma ACV simplificada.

A dissertação foi impulsionada na sequência de duas monografias efetuadas no âmbito das disciplinas Revestimentos e Acabamentos e Manutenção das Construções sob o título “Coberturas Verdes de Tipologia Extensiva” e também, numa fase exploratória, por um artigo publicado no 6º Congresso Luso-Brasileiro para Planeamento Urbano, Regional, Integrado e Sustentável - (Re)inventar a cidade em tempos de mudança, realizado na Fundação Calouste Gulbenkian em Lisboa, sob o título “Aplicação da Avaliação do Ciclo de Vida a Projeto de Reabilitação Urbana De Coberturas Verdes na Cidade de Lisboa” (Alves, 2014).

1.2. METODOLOGIA

A metodologia seguida para o desenvolvimento da dissertação compreendeu as seguintes etapas: **i)** Revisão de literatura; **ii)** Contacto com fabricantes de coberturas verdes; **iii)** Contato com empresas de *software* de Avaliação do Ciclo de Vida; **iv)** Aplicação da metodologia de Avaliação do Ciclo de Vida.

Numa primeira abordagem, procurou-se conhecer o enquadramento histórico da ACV na indústria, desde 1970 até à atualidade. De seguida, procurou-se definir o conceito de Avaliação do Ciclo de Vida, perspectivando os principais desafios metodológicos que a ACV enfrenta na indústria da construção de edifícios e realizou-se uma revisão de literatura sistemática de estudos de “ACV na Indústria da Construção de Edifícios”, desde o edifício inteiro, passando pelas suas componentes, até aos materiais/produtos de construção. O resultado da pesquisa condensa-se numa listagem de 17 estudos de LCA (e *non LCA-based*) de componentes “coberturas verdes extensivas”, publicados no sector da construção de edifícios.

Depois, realizou-se uma revisão de ferramentas de avaliação ambiental de edifícios e abordou-se a temática da “Normalização e legislação”, segundo as mais recentes diretivas internacionais de ACV na indústria da construção de edifícios. Por fim, foi elaborada uma análise crítica, tentando obter uma resposta para a questão de sustentabilidade - *Que abordagem será mais adequada para as coberturas verdes de tipologia extensiva?* —conduzindo assim à seleção das ferramentas mais adequadas. Também foi incluído um resumo de coberturas verdes de tipologia extensiva, abordando vários aspectos importantes.

A recolha de informação junto de fabricantes de coberturas verdes pretendeu complementar a informação recolhida pelos processos descritos na anteriormente, através de documentação sobre produtos existentes no mercado e entrevistas.

A escolha de *software* de Avaliação do Ciclo de Vida incidiu sobre a ferramenta *GaBi 6.0 Education Version (PE International)*. *GaBi (Ganzheitliche Bilanzierung Integrated Assessment)* consiste num pacote de *software*, desenvolvido na Universidade de Stuttgart (Alemanha), o qual permite avaliações do ciclo de vida em conformidade com a ISO 14040 (PE Int'l, GaBi. 2013). Este *software* utiliza uma base de dados de produtos integrada que foi desenvolvida ao longo de revisões da indústria e bibliografia técnica. A versão educacional utilizada nesta dissertação tem algumas limitações no que diz

respeito às bases de dados disponíveis. No entanto, a ferramenta é totalmente funcional, contendo um banco de dados abrangente dirigido especificamente a estudantes e professores universitários.

A documentação do *software GaBi* utilizado nesta dissertação baseia-se nas normas internacionais ISO 14040, ISO 14044, na ELCD (European Life Cycle Database), bem como na experiência da *PE International* e da *LBP- University of Stuttgart* (PE Int'l, GaBi. 2014). *PE International*, actualmente *Thinkstep* é uma empresa de consultoria e *software* de sustentabilidade, com sede em Leinfelden-Echterdingen (Alemanha), tendo um grupo de trabalho no campo da ACV. A descrição da metodologia adotada é feita no Capítulo 3 (PE Int'l, GaBi. 2014).

Para atingir o objetivo principal da dissertação, foi aplicada a metodologia de Avaliação do Ciclo de Vida, utilizando o *software GaBi 6.0 Education Version*. Este ferramenta metodológica pode ser utilizada por qualquer arquitecto ou engenheiro civil não especializado em questões de sustentabilidade. No entanto, um *software* de ACV cobre questões complexas e abrangentes no tempo, no espaço e na interdisciplinaridade, pelo que requer um período de aprendizagem. Esta dissertação pretende constituir um contributo para o aperfeiçoamento metodológico em processos de intervenção no edificado urbano, tendo em consideração a forte vertente metodológica duma ACV simplificada. A implementação da tecnologia de construção de coberturas verdes e a sua generalização passa pelo desenvolvimento da metodologia de ACV em fase de projeto.

1.3. ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

A presente dissertação está organizada em 5 capítulos: Introdução; Estado da Arte; Metodologia; Interpretação de Resultados; e Conclusões Finais.

No presente capítulo (Introdução), foram expostos os fundamentos motivadores da realização desta dissertação, enunciando o objetivo proposto e a metodologia de investigação seguida para o alcançar.

No Capítulo 2 (Estado da Arte) realizou-se a revisão de literatura.

No Capítulo 3 foi desenvolvida a metodologia de Avaliação do Ciclo de Vida aplicada.

No Capítulo 4 é realizada a fase de interpretação - parte integrante duma ACV - mostrando os resultados obtidos por meio da ferramenta *GaBi 6.0 Education Version*. Na fase (iterativa) de interpretação, os resultados são verificados e avaliados, devendo ser consistentes com os requisitos do objetivo e âmbito. Esta fase inclui três etapas principais (PE Int'l, GaBi, 2014): i) Identificação de questões significativas; ii) avaliação iii) conclusões finais (Capítulo 5). A organização deste capítulo segue a estrutura metodológica apresentada na documentação do *software GaBi*, excluindo as conclusões finais, que serão apresentadas no Capítulo 5.

No Capítulo 5 apresentam-se as Conclusões Finais e os Desenvolvimentos Futuros, elaboradas com base nas conclusões preliminares obtidas no capítulo anterior e assumindo que a presente ACV é simplificada, mas com alguns processos detalhados. Essas conclusões estruturam-se nos 3 aspectos seguintes: i) Inventário de Ciclo de Vida (LCI): recursos materiais; resíduos; emissões; recursos energéticos; resultados da Análise Energética do Ciclo de Vida (LCEA) comparativa; comparação cumulativa da energia operacional e da energia incorporada; efeito indireto da redução da Ilha de Calor Urbana (ICU); ii) Análise comparativa das duas coberturas (LCIA): Sequestro de carbono de coberturas verdes extensivas; iii) Análise comparativa de camadas funcionais (LCIA)

2. ESTADO DA ARTE

2.1. CONSIDERAÇÕES GERAIS

O presente capítulo está organizado em 6 subcapítulos. Inicialmente, trata-se do desenvolvimento e aplicação da Avaliação do Ciclo de Vida (LCA: *Life Cycle Assessment*) na indústria em geral, procurando entender o seu enquadramento histórico desde 1970 até à atualidade,

De seguida, define-se genericamente o conceito de Avaliação do Ciclo de Vida, tendo sido apresentados os 5 principais desafios metodológicos que a ACV enfrenta na indústria da construção de edifícios (nesta dissertação será utilizada a abreviatura ACV para designar Avaliação do Ciclo de Vida).

Realiza-se uma revisão de literatura em que foram selecionados 82 casos de estudo, tentando assim organizar e completar a literatura existente sobre a ACV aplicada ao sector da construção de edifícios, seguindo diferentes classificações: desde o edifício como um todo, passando pelas suas componentes (ou combinações destas), até aos respectivos elementos (*layers*: materiais/produtos de construção) (Kellenberger et al, 2009), sendo o objeto de análise desta pesquisa, a componente “cobertura verde extensiva” do sistema “edifício”.

Realiza-se também uma revisão de ferramentas de avaliação ambiental de edifícios - a informação selecionada foi organizada e classificada segundo dois sistemas de classificação (*ATHENA e IEA Annex 31*). A temática da “Normalização e legislação” desenvolve-se ao longo das mais recentes diretivas internacionais que servem de apoio à prática da ACV na indústria da construção de edifícios. Por fim, é elaborada uma “Síntese”, onde se realiza uma análise crítica do “Estado da Arte”. Com o objetivo de entender o objeto em análise, também é apresentado conjuntamente um resumo sobre as coberturas verdes de tipologia extensiva.

2.2. ENQUADRAMENTO HISTÓRICO DA ACV: DA CONCEPÇÃO À SUSTENTABILIDADE

2.2.1. 1970-1990: décadas de concepção

A Avaliação do Ciclo de Vida (LCA: *Life Cycle Assessment*) teve o seu início na década de 60. Os primeiros estudos, agora reconhecidos como parciais, datam do final dos anos 60 e início dos anos 70. Pode-se afirmar que o período 1970-1990 compreendeu as décadas de concepção da ACV, com abordagens, terminologias e resultados amplamente divergentes, tendo existido uma clara falta de discussão científica a nível internacional e de plataformas de intercâmbio para a ACV. Durante as décadas de 70 e 80, as ACV foram realizadas recorrendo diferentes métodos e sem um quadro teórico comum. A ACV foi repetidamente aplicada por empresas para fundamentar alegações de mercado. Os resultados obtidos eram muito diferentes, mesmo quando os objetos de estudo eram idênticos, impedindo a ACV de se tornar uma ferramenta analítica mais aceite e aplicada (Guinée et al. 1993).

2.2.2. 1990-2000: década de normalização

Guinée et al. (2010) considera que a década de 90 assistiu a um crescimento notável de atividades científicas e de coordenação a nível global, o que se refletiu no número de *workshops* e fóruns organizados, bem como no número de guias e manuais produzidos. CALCAS (2008), citando vários autores, refere que em vários países foram realizadas iniciativas nacionais que conduziram a métodos de âmbito nacional ou regional, principalmente na Holanda (Heijungs et al, 1992), na Escandinávia (Lindfors et al, 1995) e nos EUA (Vigon et al, 1993). A proliferação de métodos e terminologias mutuamente incompatíveis criou um novo problema e daí nasceu a iniciativa, orientada para a indústria, da criação de uma norma ISO. A *International Organization for Standardization* (ISO) foi envolvida na ACV conjuntamente com a *Society of Environmental Toxicology and Chemistry* (SETAC), desde 1994. Dispondo a SETAC de grupos de trabalho focados no desenvolvimento e harmonização de métodos, a ISO adotou a tarefa formal da normalização de métodos e procedimentos, existindo atualmente duas normas internacionais (ISO, 2006): i) ISO 14040 (2006): ii) ISO 14044 (2006). Um resultado importante do trabalho de normalização da ISO foi a definição de um quadro metodológico geral. A evolução gradual da ACV reflete-se na publicação de uma série de normas e relatórios técnicos da ISO.

O período de 1990-2000 pode então ser caracterizado como um período de convergência, através da coordenação da SETAC e das atividades de normalização da ISO, proporcionando assim, um quadro (*framework*) normalizado, uma

terminologia e uma plataforma para debate e harmonização dos métodos de ACV. Note-se, contudo, que a ISO nunca teve como objetivo normalizar os métodos de ACV em detalhe: “não existe um método único para a realização duma ACV” (ISO14040, 2006). No entanto, este período também constituiu uma fase de escrutínio científico e de investigação sobre as bases da ACV, explorando conexões com as disciplinas existentes.

2.2.3. 2000-2010: década de elaboração

A primeira década do século XXI revelou uma crescente atenção relativa à ACV: em 2002, o *United Nations Environment Programme* (UNEP) e a *Society for Environmental Toxicology and Chemistry* (SETAC) lançaram a *International Life Cycle Partnership*, conhecida como the *Life Cycle Initiative* (UNEP, 2010). O principal objectivo da Iniciativa foi formulado, tendo sido criados 3 programas que visavam colocar o pensamento do ciclo de vida em prática e melhorar as ferramentas de apoio através de melhores dados e indicadores (EPA, 2006): i) O programa *Life Cycle Management* (LCM) criou uma consciência, melhorando as habilidades dos decisores, por meio da produção de materiais de informação, estabelecendo fóruns para partilha de boas práticas e promovendo a realização de programas de treino a nível internacional; ii) O programa *Life Cycle Inventory* (LCI) melhorou o acesso global a dados do ciclo de vida transparentes e de alta qualidade, hospedando e facilitando grupos de especialistas, cujo trabalho resultaria na criação de sistemas de informação baseados na web; iii) O programa *Life Cycle Impact Assessment* (LCIA) aumentou a qualidade e o alcance global dos indicadores de ciclo de vida, promovendo o intercâmbio de opiniões entre especialistas, cujo trabalho resultou num conjunto de recomendações amplamente aceites.

O período 2000-2010 pode ser caracterizado como a década de elaboração, mas também novamente como uma década de divergência de métodos. Abordagens divergentes foram desenvolvidas (Guinée et al. 2010): abordagens relacionadas com os limites do sistema e métodos de alocação (Finnveden et al, 2009; Zamagni et al, 2008); ACV dinâmica (Pehnt, 2006; Björk et al. 2002; Levasseur, 2010; Kendall et al, 2009); ACV espacialmente diferenciada (Finnveden et al, 2009; Zamagni et al, 2008); ACV baseada no risco (Assies, 1998; Nishioka et al, 2006; Saouter et al, 2000; Sonnemann et al, 2004); *environmental input-output based LCA* (EIO-LCA) e ACV híbrida (Suh et al, 2004; Hendrickson et al, 2006; Heijungs et al, 2006); Custo de Ciclo de Vida (LCC: *Life Cycle Cost*) (Hunkeler et al, 2008) - utilizado pela primeira vez na década de 1960 pelo Departamento de Defesa dos EUA para a aquisição de equipamento militar de alto custo (Sherif et al, 1981); Avaliação Social do Ciclo de Vida (SLCA: *Social Life Cycle Assessment*) (Benôit et al. 2009). Estas diferentes abordagens têm em comum a base do ciclo de vida, mas diferem na elaboração metodológica e nas questões colocadas.

Apesar de ter sido publicada bibliografia didática sobre a ACV (Guinée, 2002; Baumann et al, 2004; EC, 2010), existe uma necessidade adicional de estruturação deste campo variável de abordagens. A Comissão Europeia (EC) reconheceu esse desafio e, em 2006, encomendou o projeto CALCAS (*Co-ordination Action for Innovation in Life Cycle Analysis for Sustainability*), no sentido de estruturar o campo de variação das diversas abordagens e de definir linhas de investigação e programas para sua promoção.

Um dos principais resultados do projeto CALCAS (CALCAS, 2010, citado por Guinée et al, 2010) diz respeito ao estabelecimento dum quadro para a *Life Cycle Sustainability Analysis* (LCSA), ligando as questões de sustentabilidade do ciclo de vida ao conhecimento necessário para a sua resolução, identificando conhecimento disponível e modelos relacionados, lacunas de conhecimento e definindo programas de pesquisa para preencher essas lacunas.

2.2.4. 2010-2020: década da Sustentabilidade do Ciclo de Vida (LCSA)

Guinée et al. (2010) definem o quadro da LCSA (Figura 2.1) como uma estrutura para a futura ACV, identicando 3 diferenças importantes comparativamente ao quadro da ISO 14040. Os autores acrescentam que o quadro da LCSA amplia o âmbito da atual ACV, a partir dos principais impactes ambientais, para cobrir todas as três dimensões da sustentabilidade (pessoas, planeta e prosperidade). Também amplia o âmbito de questões predominantemente relacionadas com o produto (nível de produto) para nível de setor e nível vasto de economia.

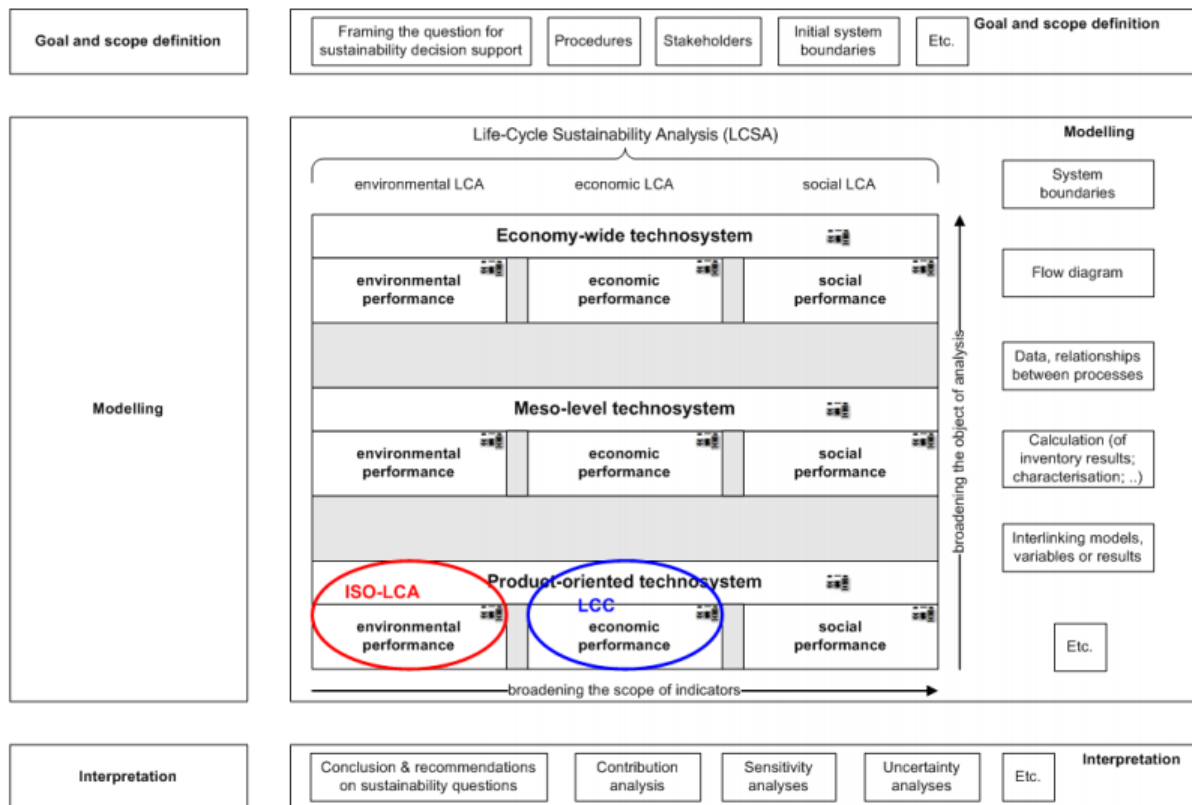


Figura 2.1 - Road map para a LCSA. As duas ovas indicam as ISO-LCA e LCC (Zamagni et al, 2009)

Guinée et al. (2010) faz uma análise em 3 vertentes do road map para a LCSA (Figura.2.1):

a) Fusão da Análise de Inventário (LCI) e da Avaliação de Impacte (LCIA) numa única fase de modelação

Na última década do trabalho académico é difícil fazer uma separação clara entre comportamento e tecnologia e entre tecnosfera e ecosfera (Guinée et al, 2010). Por exemplo, os impactos reais de um processo aparentemente tecnológico, como os transportes, estão ligados ao comportamento do consumidor, à formulação de políticas, a investimentos estratégicos, etc. Alguns modelos *end point*, como o *Eco-Indicator 99* (Goedkoop, 1999) e o *ReCiPe* (Goedkoop et al. 2010) incluem cenários de adaptação humanos nos seus modelos *end point* sobre mudanças climáticas, mas não incluem as implicações ambientais destes cenários de adaptação

b) Ampliação do objeto de análise (dimensão vertical)

A análise da sustentabilidade do ciclo de vida pode ser realizada a três diferentes níveis: produto, *meso* ou economia.

Os produtos são definidos nas normas ISO 14040 e compreendem qualquer bem ou serviço. Sistemas de produtos que desempenham a mesma de função (ou funções) poderão ser comparados. Exemplos de métodos e modelos a este nível incluem: ACV de processos, EIO-LCA, ACV híbrida, Custo do Ciclo de Vida (LCC) e LCA Social (SLCA).

Meso refere-se a um nível intermédio entre o produto e toda a economia (*economy-wide*). Pode incluir grupos de produtos e tecnologias relacionados, *baskets of commodities* (p. ex. o *product folio* de uma empresa), um município, uma família, etc. Definir e encontrar métodos e modelos apropriados para este nível necessita de mais investigação (Guinée et al. 2010), mas pode incluir análise *input-output* ambiental (EIOA: *environmental input-output analysis*), análise *input-output* (IOA: *input-output analysis*) e modelos de equilíbrio parcial.

O termo *economy-wide* refere-se a economias de estados ou outras entidades políticas ou geográficas e, eventualmente, ao mundo. Uma questão-exemplo a este nível, poderia consistir na comparação de opções para domínios tecnológicos emergentes, como por exemplo- a introdução em larga escala de energia eólica ou solar fotovoltaica (como uma estratégia para a eliminação gradual do consumo de energia fóssil). Definir e encontrar métodos e modelos apropriados a este nível também carece de mais investigação mas pode, por exemplo, incluir IOA (University of Sydney, 2010) e multiregião IOA

(Sonis, 1993). Obviamente, os três níveis descritos não são rigidamente definidos, podendo existir questões situadas entre dois níveis.

c) O alargamento do âmbito de Indicadores (dimensão horizontal)

As análises são realizadas, no mínimo, por um conjunto de indicadores de sustentabilidade (ambientais, económicos e/ou sociais). É feita uma distinção entre análises do ciclo de vida com apenas um conjunto de indicadores de sustentabilidade (ambiental, económico ou social) e análises de sustentabilidade do ciclo de vida compostas por indicadores de desempenho para todos os três (pelo menos, dois) pilares do desenvolvimento sustentável (Sonis, 1993).

A LCSA apresenta semelhanças com o campo da Avaliação Integrada (IA: *Integrated Assessment*). Sluijs (2002) define IA como "um processo interdisciplinar para combinar, interpretar e comunicar conhecimento de diversas disciplinas científicas, de tal maneira que toda a cadeia causa-efeito de um problema possa ser avaliada [...]".

2.3. METODOLOGIAS DE ACV

2.3.1. Definição de ACV

O objetivo da ACV é compilar e avaliar as consequências ambientais de diferentes opções para o cumprimento de uma determinada função (Hauschild & Wenzel, 1998). Conforme definido na ISO 14040 (1997), a Avaliação do Ciclo de Vida é uma compilação e avaliação dos *inputs* e *outputs* e dos potenciais impactes ambientais de um sistema de produtos ao longo do seu ciclo de vida. Segundo a norma ISO 14041 (1998E), um sistema de produtos consiste numa colecção de processos elementares ligados entre si por fluxos de produtos intermediários que desempenham uma ou mais funções definidas. [...] A propriedade essencial de um sistema de produtos caracteriza-se pela sua função e não pode ser definida apenas em termos de produtos finais.

Cabeza et al. (2014) definem Avaliação do Ciclo de Vida como uma ferramenta destinada a analisar sistematicamente o desempenho ambiental de produtos ou processos ao longo do seu ciclo de vida, incluindo a extração de matéria-prima, fabrico, utilização, desmantelamento em fim de vida (*EOL: end-of-life*) e reciclagem. Assim, a ACV é muitas vezes considerada uma abordagem do "berço ao túmulo" (*cradle to grave*) para avaliação de impactes ambientais.

Silvestre et al. (2013) propõem uma abordagem para fornecer a avaliação do ciclo de vida ambiental, energética e económica do "berço ao berço" (*cradle to cradle*) - 3E-C2C - de componentes de edifício, desenvolvida seguindo as orientações já incluídas em projectos de normas europeias (*European draft standards*) para a avaliação da sustentabilidade de edifícios e produtos de construção..

A Organização Internacional de Normalização (ISO: *International Organization for Standardization*) adotou um padrão de gestão ambiental na década de 90, como parte de sua série de normas 14000, com as 14040 centradas na criação de metodologias para a ACV. Abordagens semelhantes foram adotadas por outras organizações internacionais. Uma faceta importante da norma ISO consiste numa grelha iterativa de quatro passos para a realização de análises ACV: **i)** definição do objetivo e do âmbito; **ii)** análise de inventário (LCI); **iii)** avaliação de impacte do ciclo de vida (LCIA); **iv)** interpretação (Tabela 2.1).

Tabela 2.1 - Definições de LCA (adaptado de Cabeza et al, 2014).

	Acrónimo	Conceito	Definição
1	LCA	<i>(Life cycle assessment)</i> Avaliação do Ciclo de Vida ACV	Compilação e avaliação dos <i>inputs</i> , <i>outputs</i> e dos potenciais impactes ambientais de um sistema de produtos ao longo do seu ciclo de vida.
2	LCI	<i>(Life cycle inventory analysis)</i> Análise do Inventário do Ciclo de Vida ICV	Fase de avaliação do ciclo de vida que envolve a compilação e a quantificação de <i>inputs</i> de um produto durante o seu ciclo de vida.
3	LCIA	<i>(Life cycle impact assessment)</i> Avaliação de Impacte do Ciclo de Vida AICV	Fase de avaliação do ciclo que visa compreender e avaliar a magnitude e a importância dos potenciais impactes ambientais de um sistema de produtos ao longo do seu ciclo de vida.
4	-	Fase de interpretação do ciclo de vida	Fase de avaliação do ciclo de vida em que os resultados do inventário e da avaliação de impacte, ou de ambos, são avaliados em relação ao objetivo e âmbito definidos, a fim de chegar às conclusões e recomendações.
	LCEA	<i>(Life Cycle Energy Analysis)</i> Análise de Energia do Ciclo de Vida AECV	Abordagem em que todas as necessidades energéticas de determinado produto são contabilizadas - não apenas os <i>inputs</i> da energia direta durante a fase de fabrico, mas também todos os <i>inputs</i> da energia necessária para produzir componentes, materiais e serviços necessários ao processo de produção. Os edifícios consomem energia direta ou indiretamente em todas as fases do seu ciclo de vida, desde o berço até o túmulo (<i>cradle to the grave</i>) e há interação entre as fases de utilização de energia (energia incorporada e energia operacional). Por isso, devem ser analisados do ponto de vista do ciclo de vida.
	LCCA	<i>(Life Cycle Cost Analysis)</i> Análise de Custo do Ciclo de Vida ACCV	Método para avaliar o custo total de propriedade de instalações (<i>total cost of facility ownership</i>), tendo em conta todos os custos de aquisição, propriedade e alienação de um edifício ou sistema de construção. Vários investigadores têm realizado LCC de edifícios (Dakwale et al, 2011).
	ILCD	<i>(International reference life cycle data system)</i> Sistema de Referência Internacional de Dados do Ciclo de Vida	ILCD consiste no <i>ILCD Handbook</i> e no <i>ILCD Data Network</i> . Fornece aos governos e às empresas uma base para assegurar a qualidade e a consistência dos dados do ciclo de vida, métodos e avaliação.

A LCEA faz parte integrante duma ACV, sendo aqui apresentados vários casos de estudo representativos, nos quais foi adotada esta metodologia energética aplicada a edifícios (sistemas), subsistemas, componentes e elementos (materiais de construção). Ramesh et al. (2010), citados por Cabeza et al. (2014) fazem uma revisão de literatura incluindo LCEA, resultados de LCE, edifícios de baixo consumo energético (*low energy buildings*) e LCEA por tipologia de construção.

2.3.2. ACV na indústria da construção de edifícios: 5 desafios metodológicos

Cabeza et al. (2014) consideram que, apesar do crescente corpo de literatura, o conceito da avaliação do ciclo de vida é relativamente novo no que respeita à tomada de decisão na indústria da construção. A maioria das aplicações encontradas na literatura seguem o tradicional processo baseado numa abordagem ACV, enquanto que alguns estudos começam a utilizar abordagens híbridas mais avançadas (Singh et al, 2011). Alguns estudos têm tentado incorporar considerações de ordem económica, ao incluir a Análise de Custo do Ciclo de Vida (*LCCA: life-cycle cost analysis*) conjuntamente com a ACV. Por exemplo, Ristimäki et al. (2013) combinam a ACV e a LCCA numa análise dum novo sistema de energia dum bairro residencial, enquanto Heijungs et al. (2013) contribuem para o desenvolvimento duma estrutura computacional de análise da sustentabilidade do ciclo de vida (LCSA), unificando ACV e LCCA.

No que concerne à LCEA, Crawford et al. (2010) apresentam um quadro global para avaliação a energia do ciclo de vida de componentes da construção de edifícios, Castleton et al. (2010) estudam as poupanças energéticas e o potencial para reabilitação resultante da instalação de coberturas verdes no topo dos edifícios e Sailor (2008) concebe um modelo de coberturas verdes para *software* de simulação energética de edifícios.

No entanto, Cabeza et al. (2014) consideram que, em comparação com as aplicações convencionais de ACV para produtos industriais, aquelas relacionadas com a indústria da construção enfrentam os seguintes 5 desafios adicionais:

i. Impactes específicos do site de construção

O desenvolvimento de edifícios é um processo específico localizado. Vários impactes locais poderão ser considerados nas avaliações de edifícios: efeito do edifício no microclima envolvente, acesso solar de edifícios adjacentes, drenagem de águas pluviais e segurança da vizinhança (Kohler et al. 2003).

ii. Complexidade do modelo

A amalgamação de um grande número de materiais e produtos num edifício torna a recolha de dados numa ACV muito mais desafiadora do que para a maioria das aplicações baseadas em produtos (Kohler et al. 2003). Cada um destes materiais e produtos tem o seu próprio ciclo de vida discreto e interage como parte de uma construção ou sistema. A modelação de tais sistemas dinâmicos pode representar um significativo desafio (Erlandsson et al, 2003). Além disso, a construção é mais do que uma combinação de materiais - processos de construção podem ter significativos impactes e devem ser incluídos no quadro de avaliação (Guggemos et al, 2006). Este aspecto não é claro, uma vez que outros investigadores afirmam que o processo de construção pode ser negligenciado devido à sua baixa contribuição para o impacte global (Kellenberger et al, 2009).

Erlandsson e Borg (2003) recomendam a não utilização de uma simples abordagem estática linear que começa com a construção e segue com a operação (incluindo a manutenção), terminando nas fases de demolição e tratamento de resíduos. Alternativamente, os referidos autores defendem a utilização de serviços fornecidos como unidades funcionais - tratando os sistemas de edifícios como prestadores de serviços dinâmicos que poderão sofrer mudanças ao longo do tempo - através de uma abordagem sequencial de ACV, desenvolvendo uma estrutura de modelação flexível que permita opções do utilizador.

O conceito de LCA dinâmico (DLCA) foi novamente utilizado no sector de edifícios por Collinge et al. (2013). Estes autores definem o conceito de DLCA como "uma abordagem para a ACV que incorpora explicitamente a modelação de processos dinâmicos no contexto das variações temporais e espaciais dos sistemas industriais e ambientais que os rodeiam". Depois de aplicarem esta abordagem metodológica a um edifício institucional, os autores concluem que os resultados de DLCA sugerem que, em alguns casos, alterações durante a vida útil dum edifício podem influenciar os resultados da ACV, mais do que as fases de materiais e construção.

iii. Incerteza de cenário

A longa fase de utilização de edifícios resulta em consideráveis incertezas na ACV e os analistas fazem suposições para a operação e manutenção de edifícios durante esta fase (Kohler et al, 2003). Acresce que a fase EOL (*end-of-life*) apresenta incertezas relacionadas com a reabilitação ou demolição e aterro dos vários elementos componentes da construção.

Huijbregts et al. (2003) expressaram preocupação com várias incertezas relacionadas com a ACV e apresentaram uma metodologia para simultaneamente quantificar parâmetros, cenários e incerteza do modelo, através dum caso de estudo de isolamento dum edifício residencial, considerando as incertezas provenientes de variações nas unidades funcionais, fronteiras do sistema, métodos de alocação, tempo de vida útil do produto, categorias de impacte e heterogeneidade temporal/geográfica como incerteza de cenário. As incertezas do modelo são consequência dos seguintes fatores: falta de dados, hipóteses de estado estacionário, não-linearidades em processos, interações entre poluentes e sensibilidade do ambiente receptor. Os autores utilizaram a simulação de Monte Carlo para quantificar a incerteza dos parâmetros e aplicaram várias configurações de decisão para quantificação da incerteza de cenário e modelo. Também sugeriram melhorias para a metodologia proposta, utilizando uma análise mais sistemática da incerteza de cenário e modelo, recomendando o desenvolvimento de bases de dados de LCI (*Life Cycle Inventory*) com informação espacial e de incerteza embutida

iv. Ambientes interiores

Os edifícios implicam o desenvolvimento de ambientes interiores. As opções de projeto podem conter um conjunto completamente novo de potenciais impactes sobre o bem-estar dos utentes e sobre o desempenho e comportamento durante a fase de utilização do edifício. As metodologias típicas de ACV não abordam esses impactes, ainda que estes ocorram durante a fase mais longa da avaliação e contribuam para o total dos impactes (Singh et al, 2011).

Jönsson et al. (2000) argumentaram que a ACV convencional subestima importantes problemas ambientais em ambientes interiores, tais como a saúde humana na avaliação de edifícios. O autor investigou a possibilidade de incorporar questões

de clima dos ambientes interiores, como uma categoria de impacto na ACV para produtos de construção. No entanto, as diferenças metodológicas da ACV, a avaliação de emissões de materiais (*MEA: Material Emissions Assessment*) e avaliação do clima interior (*ICA: Indoor Climate Assessment*) são determinadas como fatores limitativos para tais ajustes metodológicos.

Hellweg et al. (2005) criticou as atuais práticas de ACV para a não incorporação de efeitos de saúde ocupacional no âmbito do quadro de avaliação. Afirmaram que negligenciar efeitos de saúde ocupacional pode resultar em otimizações de produto ou de processo em detrimento da saúde dos trabalhadores. Os autores incorporaram os efeitos na saúde humana decorrentes da exposição no local de trabalho no âmbito do quadro da ACV, tendo apresentado três aplicações em casos de estudo para determinar a significância desses impactos. Os resultados apresentados foram contraditórios relativamente a avaliações anteriores que tinham sublinhado o significado do consumo de energia em relação a outros impactos ambientais e concluíram que os efeitos sobre a saúde humana na fase de utilização devem ser considerados na análise ambiental para evitar a mudança de carga do ambiente para a saúde dos trabalhadores.

Assefa et al. (2007) concordaram com os estudos anteriores sobre a necessidade de incluir preocupações de bem-estar dos ocupantes na avaliação de desempenho do ciclo de vida de edifícios, a fim de melhor atender a tomada de decisão. Os autores utilizaram a metodologia *EcoEffect* proposta anteriormente por Eriksson et al. (2005) e propuseram avaliar os impactos finais resultantes dos ambientes interiores e exteriores dos edifícios, em termos de *Disability Adjusted Life Years* (DALY para as populações humanas consiste numa medida global da carga de doenças (*overall disease burden*), expressa no número de anos perdidos devido a problemas de saúde, deficiência ou morte prematura). DALY é também uma métrica padrão em modelos de avaliação de inventário de ciclo de vida (LCI). Além disso, os autores sugeriram a condução de uma análise de custo do ciclo de vida paralela, tendo em conta a avaliação económica.

Abeysondra et al. (2007) propuseram uma metodologia de três pilares para avaliar os produtos de edifícios a partir da perspectiva do ciclo de vida ambiental, social e económico. Os autores apresentaram uma avaliação de caixilharias (portas e janelas em madeira e alumínio), utilizando dados de edifícios no Sri Lanka. Utilizaram uma ACV baseada em processos, no sentido de avaliar os impactos ambientais, uma metodologia de custo do ciclo de vida para a análise económica e inquéritos a engenheiros e utilizadores para avaliar os efeitos sociais de ambas as alternativas. Curiosamente, verificaram que as portas e janelas em madeira eram superiores nas escalas ambiental e económica, enquanto que as soluções de alumínio foram consideradas preferíveis na escala social, o que aponta para necessárias soluções de compromisso.

v. Inclusão de dados de materiais reciclados

A sustentabilidade de edifícios recomenda a utilização dos resíduos e materiais reciclados como novos materiais de construção, sendo que tais dados normalmente não estão incluídos nas bases de dados de ACV (Pérez et al, 2012).

2.4. ACV NA INDÚSTRIA DA CONSTRUÇÃO DE EDIFÍCIOS

2.4.1. ACV (BMCC) versus ACV (WPC)

Segundo Cabeza et al. (2014), há longo tempo que os métodos de Avaliação do Ciclo de Vida têm sido utilizados para avaliação ambiental de processos de desenvolvimento de produtos em outras indústrias, apesar da aplicação no sector da construção de edifícios ter um estado de arte de apenas 10 anos (Singh et al, 2011; Buyle et al, 2013). O estudo de ciclo de vida remonta aos anos 70/80 e tem permanecido demasiado focado na quantificação da energia, materiais utilizados e resíduos libertados para o meio ambiente.

Porque a ACV desenvolve uma abrangente abordagem sistémica da avaliação ambiental, tem sido crescente o interesse em incorporar métodos de ACV na tomada de decisão do sector da construção de edifícios para a seleção de produtos ambientalmente preferenciais, bem como para a avaliação e otimização dos processos de construção (Asdrubali et al, 2013). Além disso, um crescente “corpo” de literatura tem sido desenvolvido, empregando métodos de ACV na avaliação de desempenho dos edifícios, na sua concepção e em práticas de construção. No entanto, Cabeza et al. (2014) afirmam que a literatura de ACV ainda está bastante fragmentada e dispersa por diversas publicações, tendo por isso organizado e completado a literatura existente sobre ACV aplicada ao sector da construção.

Cabeza et al. (2013) também consideram que os casos de estudo encontrados na literatura são difíceis de comparar, devido às suas propriedades específicas, tais como: tipo de construção, clima, exigências de conforto, regulamentos locais, etc. Os autores elaboraram uma compilação de casos de estudo à escala mundial, recorrendo a métodos ACV (bem como

LCEA e LCCA, de edifícios e do setor da construção. As características mais importantes da ACV são comparadas (âmbito, tempo de vida útil, unidade funcional considerada, limites do sistema, localização e tipologia de construção), tendo-se constatado que a maioria dos casos de estudo são realizados em países desenvolvidos.

Os autores consideram ainda que, comparativamente a outros produtos, os edifícios são mais difíceis de avaliar - grandes em escala, complexos a nível de materiais, funcional e temporalmente dinâmicos devido à vida útil limitada dos componentes de construção e aos requisitos de alterações dos utilizadores. Além disso, os seus processos de produção são muito menos padronizados do que na maioria dos bens manufacturados, causa da localização e do carácter único de cada edifício. A limitada informação quantitativa sobre os impactes ambientais do fabrico de materiais de construção ou do próprio processo de construção e demolição fazem das avaliações ambientais da indústria da construção um desafio. A avaliação de impactes ambientais de edifícios envolve mais do que a simples agregação do produto individual e avaliação de materiais. Consequentemente, vários estudos têm tentado avaliar edifícios completos, sistemas construtivos e processos de construção. Estes esforços identificaram frequentemente fases do ciclo de vida com maiores impactes ambientais e têm proporcionado uma base para a avaliação geral do sistema de construção (Cabeza et al, 2013).

Adoptando um sistema de classificação (que será em parte aqui utilizado), Ortiz et al. (2008) descrevem o estado da arte da ACV de materiais de construção e combinações de componentes (*BMCC: building materials/component combinations*) versus ACV ao longo de todo o processo de construção (*WPC-whole process of construction*), num artigo considerado referência importante na ACV, que inclui, até ao ano de publicação, literatura sobre abordagens metodológicas destinadas a preservar o meio ambiente e, assim, alcançar o desenvolvimento sustentável em países desenvolvidos e em desenvolvimento.

Numa listagem publicada nesse artigo pode-se encontrar uma avaliação do ciclo de vida comparativa de coberturas convencionais e verdes localizadas no centro de Madrid, realizada por Saiz et al. (2006), que será aqui posteriormente analisada.

Além de Ortiz et al. (2008) e, recentemente Cabeza et al. (2013), podem ser encontradas revisões de literatura com abordagens baseadas na avaliação do ciclo de vida (ACV) em Sartori et al. (2007), Ramesh et al. (2010) e Sharma et al. (2011).

Ferreira et al. (2013) realizam uma revisão e uma comparação de ferramentas de apoio à decisão na reabilitação de construções, uma revisão de métodos e objetivos das ferramentas existentes e uma identificação das necessidades de pesquisa, constatando que na procura da solução ambientalmente mais benéfica, além da fase operacional, também é importante considerar os impactes de fim de vida incorporados, especialmente em edifícios muito eficientes energeticamente. Mesmo assim, segundo os autores, para edifícios com uma vida útil superior a 30 anos, a fase de operação energia ainda representa o impacte mais significativo.

2.4.2. ACV de edifícios

Os dois gráficos seguintes foram elaborados com base nos 82 casos de estudos selecionados na revisão de literatura realizada na presente dissertação (34 no Capítulo 2.4.2; 48 no Capítulo 2.4.3), não tendo sido citados na totalidade. A Figura 2.2 inclui 34 casos de estudo classificados como avaliações de impacte ambiental WPC (*whole process of the construction*), i.e., de edifícios na sua totalidade, realizados a partir de 1982 por Bekker et al. (1982).

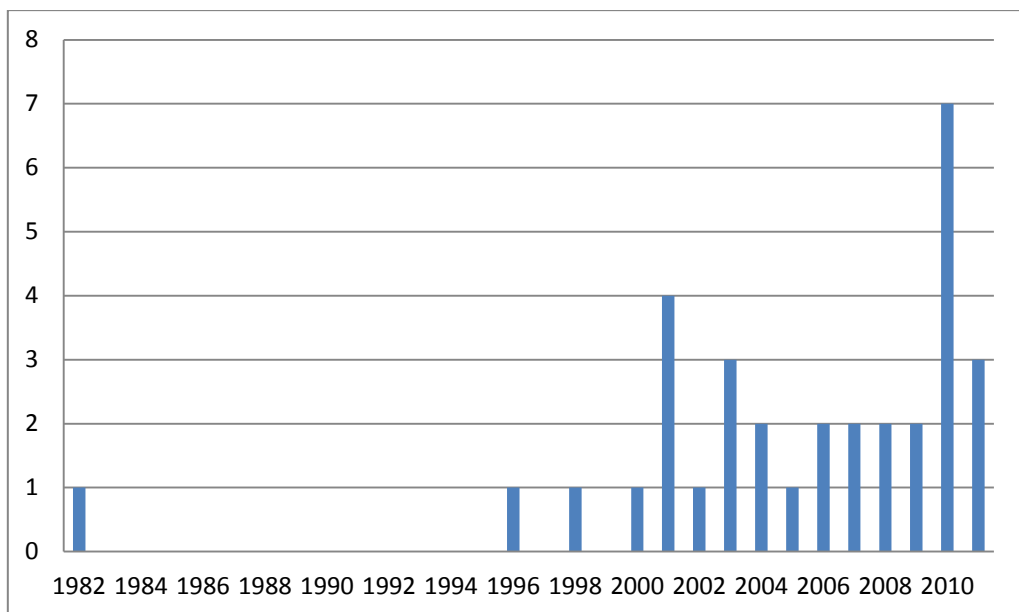


Figura 2.2 - Histograma de estudos de ACV publicados e aplicados no sector da construção de edifícios (WPC - whole process of the construction: todo o processo de construção) [ordenadas: número de estudos].

60 estudos de edifícios residenciais e não residenciais localizados em 9 países (incluindo a Suécia, Alemanha, Austrália, Canadá e Japão) foram realizados, tendo Sartori et al. (2007) constatado que a proporção de energia incorporada nos materiais utilizados e durante o ciclo de vida avaliado variava entre 9% e 46% da energia total utilizada durante a vida útil do edifício quando se tratava de edifícios de baixo consumo de energia (com bom isolamento térmico, orientação adequada, condicionamento passivo, etc.) e entre 2% e 38% em edifícios convencionais. Outros estudos afirmam que, em edifícios convencionais localizados principalmente em países da Europa do Norte e Central, a energia incorporada nos materiais é 10 a 20%, enquanto que o intervalo 80 a 90% corresponde à energia na fase de utilização, sendo menos de 1% relativo a “tratamentos” de fim de vida (Kotaji et al. 2003). Nesses estudos, a vida útil apresenta diferenças significativas entre cada país. Por exemplo, na Holanda, o valor normal é de 75 anos para residências e de 20 anos para escritórios, enquanto que no Reino Unido, o valor de 60 anos é utilizado tanto para edifícios comerciais como para edifícios residenciais; na Finlândia e na Suíça, 100 e 80 anos respectivamente. Segundo os autores, a ampla gama de resultados deve-se à variedade de edifícios, materiais, tempo de vida útil considerado e às condições geográficas e climáticas.

Também vários estudos de ACV têm sido realizados para obter e esclarecer os benefícios globais de soluções construtivas de diferentes edifícios ou, especificamente, para investigar a capacidade de reduzir o impacto ambiental de uma fase do ciclo de vida (fase operacional) sem a aumentar em mais uma etapa (fase de fabrico). Um exemplo pode ser observado num artigo publicado por Adalberth et al. (2001) relativo a um estudo de ACV para uma unidade de habitações na Suécia, para determinar o impacto ambiental durante as diferentes fases do ciclo. Noutro estudo, Rosselló-Batlle et al. (2010) estimam o impacto sobre o meio ambiente dos edifícios turísticos (hotéis) nas Ilhas Baleares (Espanha).

Sharma et al. (2011), Kofoworola et al. (2008), Mithraratne et al. (2004) e Chang et al. (2010) concluem que a fase dominante do ciclo de vida dos edifícios é a fase operacional, uma vez que consome mais energia e, portanto, tem maior impacto ambiental, enquanto que a energia incorporada constitui apenas cerca de 15 % do total da energia necessária durante o ciclo de vida. O estudo realizado por Sharma et al. (2011) consistia em rever vários edifícios em diferentes localizações, aplicando a ACV para verificar em que fase do ciclo de vida do edifício e em que tipo de construção se consumia mais energia e se emitiam mais gases de efeito estufa. Dos resultados, concluiu-se que a fase operacional representava a maior percentagem (80-85%) do consumo de energia no ciclo de e que o sector da construção de edifícios, residencial ou comercial, consumia mais energia e contribuía de forma significativa para o consumo de combustíveis fósseis e para as emissões de vários gases perigosos que levam a danos globais : ODP (*ozone depletion potential*), efeito de estufa, acidificação, etc.

Contudo, outros estudos consideram que o conteúdo de energia da fase de construção também pode ser importante e requer atenção. Por exemplo, De Gracia et al. (2010) examinam se a diminuição do impacto conseguida durante a fase

operativa compensa o aumento de impacto resultante da energia incorporada durante a fase de fabrico. Os resultados deste estudo mostram que são necessários pelo menos, 25 anos de utilização do edifício durante a fase operacional, para compensar o aumento de impacto induzido pela fase de fabrico. Este período é considerado como um longo período de recuperação, uma vez que constitui uma percentagem significativa da vida útil dos edifícios geralmente assumida (50 a 100 anos).

Ramesh et al. (2010) são os autores de outro estudo que apresenta uma visão geral sobre estudos de ACV de edifícios, esclarecendo que a redução do impacto ambiental de edifícios pode ser fortemente dependente da energia incorporada dos materiais utilizados na fase de fabrico. Thormark (2002) concluiu que a contribuição da energia contida na construção de uma habitação num edifício de baixo consumo energético na Suécia representava 40% das necessidades totais de energia.

Segundo Zabalza et al. (2011), a indústria da construção utiliza grandes quantidades de matérias-primas que também envolvem alto consumo de energia. A seleção de materiais com alto conteúdo de energia incorporada implica um elevado nível inicial de consumo de energia na fase de produção dos edifícios, mas também determina futuros consumos de energia, a fim de cumprir requisitos de aquecimento, ventilação e ar condicionado. Num artigo publicado, os autores apresentam os resultados de um estudo de ACV, comparando os materiais de construção mais utilizados com alguns eco-materiais, utilizando três diferentes categorias de impacto. O objetivo foi o de aprofundar o conhecimento de especificações ambientais e energéticas de materiais de construção, analisando as respectivas possibilidades de melhoria, e de fornecer orientações para a seleção de materiais em *ecodesign* de edifícios novos e na reabilitação de edifícios existentes. O estudo demonstra que o impacto dos produtos de construção pode ser significativamente reduzido através da promoção da utilização das melhores técnicas disponíveis e de eco-inovação em estaleiros de produção, substituindo o uso de recursos naturais finitos por resíduos gerados em outros processos de produção, de preferência disponíveis localmente. Isto estimularia a concorrência entre fabricantes para lançar produtos eco-eficientes e incentivaria o uso das “declarações ambientais de produtos” (*EPD: Environmental Product Declarations*). Nesse artigo, os vários casos analisados mostraram que o percentual de contribuição de energia tem uma elevada variação (9% a 46%). Conclui-se que o amplo intervalo de resultados é devido à variedade da natureza dos edifícios, materiais, tempos de vida considerados e condições geográficas/climáticas.

Em 2009, Zabalza et al. realizaram um estado da arte sobre a aplicação da ACV no setor da construção civil, fornecendo uma visão geral das ferramentas, *drivers* e barreiras existentes, usuários potenciais e propósitos dos estudos nessa área. Analisaram também as ferramentas de simulação térmica consideradas nas normas de certificação energética de edifícios em Espanha, tendo o estudo sido complementado por uma metodologia de ACV simplificada para avaliar o impacto de algumas melhorias no projeto de edifícios. Esta abordagem simplificada proposta permite comparações globais entre a energia incorporada - emissões dos materiais de construção e o consumo de energia - emissões associadas na fase de utilização.

Baena (2012), citando Zabalza et al. (2009), conclui que, para além de promover o uso de energias renováveis e equipamentos de alta eficiência energética, deve ser dada prioridade à bioclimática e ao *ecodesign*, utilizações de baixo impacto, materiais naturais recicláveis e disponíveis localmente, minimização do consumo de água, projetos para capturar redes de águas pluviais e esgotos em edifícios, projetos de coberturas verdes, entre outros.

Blengini et al. (2009) realizaram um ACV detalhado de uma habitação familiar de baixo consumo energético, construída no Norte da Itália, a fim de confirmar a sua sustentabilidade e eficiência energética. Observou-se que as matérias-primas tinham a maior contribuição relativa, mas a operação de manutenção também desempenhava um papel importante, embora deva notar-se a necessidade de dados mais fiáveis sobre a duração real da utilização de diversos materiais. Conclui-se também que é importante promover a reciclagem como ferramenta eficaz para a redução do impacto do ciclo de vida. Os resultados enfatizam a necessidade de verificar sistematicamente o desempenho ambiental da futura construção de baixo consumo energético adotando uma abordagem holística.

Nemry et al. (2010) realizaram uma investigação relativa a um novo tipo de edifícios representativos da UE, de acordo com a sua representatividade, distribuição geográfica, tamanho, composição e materiais de isolamento térmico. Em conclusão, foram identificadas três opções para melhorar os edifícios existentes: isolamento da cobertura adicional, isolamento da fachada adicional e novas juntas para reduzir ainda mais a ventilação.

Geralmente, os materiais usados na estrutura de edifícios representam mais de 50% da energia incorporada no edifício (Asif et al. 2007). A tipologia estrutural dum edifício condiciona fortemente a sua avaliação ambiental. Relativamente a este assunto, foram realizados estudos comparativos de ACV de dois diferentes sistemas estruturais de construção (aço e betão armado) em edifícios de escritórios (Xing et al. 2008). Apesar da quantidade de energia (por m²) para o fabrico da estrutura de aço ser 25% inferior à necessária para produzir a estrutura de betão armado (considerando o ciclo de vida completo), devido ao seu coeficiente de transferência térmica, o edifício com estrutura de aço apresenta um impacto maior em termos de energia primária e emissões.

Estudos de vários países têm demonstrado que os edifícios com estruturas de madeira requerem menos energia e emitem menos dióxido de carbono durante seu ciclo de vida do que edifícios com outros tipos de sistemas estruturais (Buchanan et al, 1999; Goverse et al, 2001; Gustavsson et al, 2006). No Canadá, por exemplo, num edifício de escritórios em aço estrutural, a energia incorporada na estrutura de aço é 1,61 vezes maior do que numa estrutura de betão, que por sua vez é 1,27 vezes maior do que numa estrutura de madeira (Cole et al, 1996) .

Em vários países do Norte da Europa, os estudos de ciclo de vida realizados indicam vantagens das estruturas de madeira. Assim, a quantidade evitada de gases de efeito estufa, através da substituição de aço por madeira em edifícios na Noruega e Suécia é de 0.06-0.88 kg CO₂ Eq /kg *input* de madeira; enquanto que na substituição de betão por madeira atinge o valor de 0.16-1.77 kg CO₂ Eq/kg (Petersen et al, 2005), apesar de, dependendo dos tratamentos aplicados à madeira, poderem existir certos efeitos toxicológicos sobre a saúde humana e os ecossistemas. É importante notar que, sob certos fatores determinantes, blocos de apartamentos com estruturas de madeira e um sistema de cogeração a biomassa conseguem produzir uma absorção líquida de CO₂ (*net absorption of CO₂*) no seu ciclo de vida (Gustavsson et al, 2010).

Chan et al. (2009) analisaram a situação do mercado de edificação “verde” em relação ao mercado da construção em geral, tendo sido investigadas, a partir da perspectiva dos arquitetos, as razões comerciais para investir no mercado de edifícios verdes (*green building*). Os dados foram recolhidos através duma pesquisa que abrangeu arquitetos de Hong Kong e Singapura. Os resultados sugerem que medidas significativas para que os interessados tenham interesse em investir na construção verde consistem em intervenções governamentais e incentivos económicos.

Pode-se também encontrar abordagens de ACV simplificadas (Bekker, 1982) que tratam do problema dos recursos naturais e não renováveis limitados e do seu impacto no sector da construção. É realizada uma demonstração de como as influências quantitativas podem ser determinadas por meio de uma adequada abordagem de ciclo de vida. Um diagrama de fluxo de *input-output* e uma simples fórmula são apresentados e discutidos, com o fim de obter mais conhecimento sobre o problema investigado.

Em várias partes do mundo existem ferramentas de apoio à decisão baseadas em ACV (orientadas para construção de edifícios) em utilização ou em desenvolvimento. Por exemplo, *Envest* no Reino Unido, *EcoQuantum* na Holanda e *ATHENA* nos EUA. Embora utilizem diferentes abordagens metodológicas e sejam de âmbito regional, todas estas ferramentas funcionam ao nível de edifícios na sua totalidade e utilizam dados de LCI (*Life Cycle Inventory*) embebidos para desenvolver indicadores *midpoint* das implicações ambientais correspondentes às alternativas de projeto. Trusty e Horst (2002), utilizando a ferramenta *ATHENA*, desenvolveram um estudo duma torre de escritórios de 18 andares com 5 níveis de estacionamento subterrâneo, projetada em estrutura de betão armado com sistema de revestimento exterior de paredes em cortina.

2.4.3. ACV de materiais de construção e componentes de edifícios

A Figura 2.3 inclui 48 casos de estudo classificados como BMCC (*building materials and component combinations*) realizados a partir de 2000 por Citherlet et al. (2000).

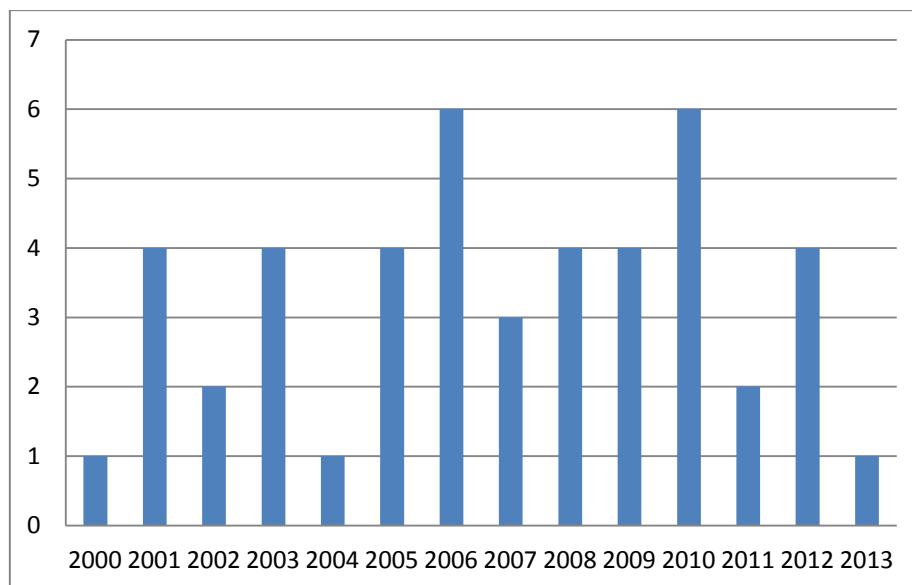


Figura 2.3 - Histograma de estudos de ACV publicados e aplicados no sector da construção de edifícios (BMCC - building materials and component combinations: materiais de construção e combinações de componentes) [ordenadas: número de estudos].

Diferentes abordagens e simplificações podem ser consideradas ao realizar uma ACV de materiais de construção e componentes de edifícios. Kellenberger et al. (2009) desenvolveram uma análise detalhada dos resultados da avaliação do ciclo de vida de diferentes componentes de edifícios (p.e., paredes de madeira e coberturas de betão armado) com diferentes níveis de simplificação (desde uma ACV abrangente, incluindo todos os materiais e processos até à componente totalmente reduzida, incluindo apenas os principais materiais remanescentes na componente). O objetivo principal consistia na determinação da relevância de materiais e processos, frequentemente negligenciada na ACV simplificada de componentes de edifícios, para proporcionar resultados de qualidade semelhante a avaliações abrangentes, mas com menor esforço. Quanto mais pesados forem os materiais utilizados e quanto maiores as distâncias de transporte, maior a influência do transporte sobre os resultados da ACV.

Segundo Zabalza et al. (2011), em Espanha, a quantidade de energia investida no fabrico de alguns materiais específicos por metro quadrado (considerando a área bruta de construção) num edifício tipo é equivalente à quantidade de energia produzida a partir da combustão de mais de 150 l de gasolina. Cada metro quadrado construído implica uma emissão média de 0,5 toneladas de dióxido de carbono e um consumo de energia de 5754 MJ (que é variável, dependendo do projeto de construção), incluindo apenas o impacto associado aos materiais. Os autores exibem gráficamente a contribuição relativa dos principais materiais de construção para o consumo de energia primária e as emissões de CO₂ associadas a um metro quadrado, num bloco de apartamentos tipo, em Espanha. O alto impacto dos materiais normalmente utilizados, como o aço, cimento e cerâmicos, é notável.

Existem inúmeros estudos publicados em que a ACV é aplicada para avaliar o impacto de diferentes materiais de construção e soluções construtivas. Khasreen et al. (2009) discutem as metodologias e aplicações de ACV no sector da construção de edifícios, revendo alguns dos estudos de ciclo de vida aplicados em edifícios (WPC) ou materiais de construção e combinações de componentes (BMCC) nos últimos 15 anos, na Europa e nos EUA.

Na área dos isolamentos térmicos, estudos realizados de ACV sobre *kenaf fibre boards* (Ardente et al. 2008), demonstram uma significativa redução do impacto ambiental em comparação com outros isolamentos baseados em materiais sintéticos. Da mesma forma, com base numa ACV e incluindo energia, emissões e aspectos económicos, foram comprovadas as vantagens dos ETICS (External Thermal Insulation Composite Systems) (Anastaselos et al. 2009), sistemas construtivos que podem reduzir o consumo de energia, emissões equivalentes de CO₂ e o custo económico total do ciclo de vida até 20%, quando comparadas com o isolamento convencional.

Que respeita a pavimentos em madeira, foram realizados estudos de ACV de diferentes revestimentos (Nebel et al, 2006), com oportunidades de melhorias centradas em processos de assentamento, acabamento superficial e manutenção, bem como no tipo de colas e vernizes utilizados em cada uma destas fases.

De Gracia et al. (2010) avaliam o impacto ambiental resultante da inclusão de materiais de mudança de fase (*PCM: phase change materials*), num edifício típico Mediterrânico. A Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) foi desenvolvida em três cubículos (monitorizados) construídos em Puigverd de Lleida (Espanha), tendo sido possível controlar a temperatura interior, utilizando uma bomba de calor doméstica para arrefecimento e um radiador eléctrico para aquecimento: O consumo de energia foi registado para determinar a economia de energia obtida. O objetivo consistia em verificar se poupanças energéticas eram suficientes para equilibrar o impacto ambiental originado durante o fabrico de PCM. Alguns cenários hipotéticos, tais como diferentes sistemas para controlar a temperatura, diferentes tipos de PCM ou diferentes condições climáticas, foram propostos e estudados utilizando o processo de ACV para apontar questões críticas. Além disso, uma análise paramétrica da vida útil de edifícios foi desenvolvida. Para um cenário hipotético, considerando as condições de verão durante todo o ano e um tempo de vida útil do edifício de 100 anos, o uso de PCM reduzia o impacto global em mais de 10%. Os resultados demonstram que a adição de PCM na envolvente do edifício, embora tenha diminuído o consumo de energia durante a fase operacional, não reduz significativamente o impacto global ao longo de toda a vida útil da construção.

No que concerne a produtos cerâmicos, existem vários estudos de ACV (Koroneos et al, 2007; Bovea et al, 2010; Nicoletti et al, 2002) que observam a alta intensidade de energia dos processos de produção (especialmente na fase de cozedura), bem como as diferentes possibilidades de melhoria existentes.

De acordo com Shukla et al. (2009) a utilização de produtos como o adobe, apesar de aumentar a energia incorporada relativa à manutenção do edifício, reduz a energia incorporada no ciclo de vida do edifício 1,5 a 2 vezes, em comparação com os materiais convencionais. Nesse sentido, a utilização de materiais alternativos, tais como blocos de betão celular, blocos de terra comprimida ou cinzas volantes, em substituição de materiais com alta energia incorporada (como o betão armado) poderia economizar 20% da energia acumulada ao longo de um ciclo de vida de 50 anos (Huberman et al. 2008).

Além disso, a reciclagem dos materiais de construção (Thormark, 2002; Blengini, 2009) é essencial para reduzir a energia incorporada no edifício. Por exemplo, a utilização de aço e alumínio reciclado, confere uma economia de mais de 50% em energia incorporada (Chen et al, 2001).

Ortiz et al. (2010) publicaram um artigo importante para a temática dos resíduos da construção, onde se avaliou, por meio da ACV, os impactos ambientais de resíduos de construção - *Environmental performance of construction waste* - comparando três diferentes cenários para a gestão de resíduos da construção na Catalunha (Espanha): aterro sanitário, incineração e reciclagem. Foram analisados vários indicadores de ciclo de vida típico, como o potencial de aquecimento global (GWP), potencial de acidificação (AP) e alguns indicadores de ecoeficiência, tais como o consumo de recursos, energias renováveis / não renováveis e água.

No caso dos resíduos do processo de construção, Ortiz et al. (2010) consideram que deve ser evitado, na medida do possível, o aterro de metais e plásticos (já que se obtém um elevado impacto nas categorias de toxicidade), enquanto que os aterros de pedra deverão ser evitados, devido à grande quantidade de resíduos gerados e grandes volumes ocupados. No caso da incineração de resíduos da construção, pode afirmar-se que os vários indicadores sugerem diferentes recomendações - como no caso dos resíduos de plástico que produzem benefícios ou prejuízos ambientais, dependendo do indicador escolhido. Portanto, as decisões finais sobre a incineração devem ter em conta vários fatores, tais como a importância das diferentes categorias de impacto, conjuntamente com os aspectos económicos e sociais. Para o caso de estudo analisado na Catalunha, os autores consideram que a reciclagem é recomendada, seguida pelo aterro e, finalmente, pela incineração.

Outro interessante artigo publicado por Werner et al. (2007) consiste em analisar os resultados de cerca de 20 anos de investigação internacional sobre o impacto ambiental do ciclo de vida de produtos de madeira utilizados no sector da construção em relação aos produtos de outros materiais com equivalência funcional. Este trabalho foi obtido através de uma extensa revisão da literatura existente, uma consulta de compilações de ACV de produtos de madeira. A lista resultante é

considerada bastante abrangente e cobre os estudos originais mais importantes para a comparação de produtos de madeira na indústria da construção na Europa, América do Norte e Austrália.

Santero et al. (2011) realizaram análises do ciclo de vida de pavimentos, considerando que a literatura existente estabelece um marco fundamental para a quantificação do impacto ambiental, mas não permite estabelecer conclusões gerais quanto à escolha de materiais, estratégias de manutenção, tempos de vida útil e outras políticas de boas práticas para alcançar as metas da sustentabilidade. Os autores afirmam que, para integralmente quantificar os impactos ambientais e dar orientação efectiva para os esforços de sustentabilidade as unidades funcionais devem ser padronizadas, os limites dos sistemas expandidos, a qualidade e fiabilidade de dados melhorada, e o âmbito dos estudos ampliado. Concluem que melhorar essas deficiências permitirá que futuros estudos realizem avaliações equitativas e comparáveis, criando, assim, um conjunto sinérgico de literatura que se constrói continuamente sobre si mesma, em vez de gerar conclusões independentes e isoladas.

Segundo Silvestre et al. (2010), a avaliação dos impactos ambientais de edifícios deve considerar a origem dos materiais de construção, os recursos utilizados na execução, as operações de manutenção, a vida útil esperada, bem como a substituição e/ou operações de demolição de cada um dos componentes dos edifícios. A abordagem integrada da Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) permite a recolha dos dados referentes a todas essas fases do ciclo de vida do edifício e a avaliação dos correspondentes impactos ambientais. Os autores apresentaram uma revisão detalhada dos resultados de ACV de mais de 10 anos de pesquisas internacionais sobre o impacto ambiental de paredes exteriores de edifícios, incluindo um resumo dos principais resultados. As recomendações para melhorar e ampliar o âmbito e a utilidade destes estudos de pesquisa foram também apresentadas.

2.4.3.1. ACV de coberturas verdes extensivas

Este capítulo (Tabela 2.2) abrange apenas as coberturas verdes extensivas. Foram também incluídos casos de estudo “não baseados em ACV” (*non LCA-based*) - geralmente focados apenas na fase operacional do ciclo de vida e na componente energética dos edifícios - bem como outro tipo de análises do ciclo de vida (p.e., IOA-LCA, CBA, LCC). Foram encontrados 5 casos de estudo que são avaliações típicas do ciclo de vida (ACV), dos quais se destacam dois (Baena, 2012; Bianchini et al, 2012; Kosareo et al, 2006, Otelé et al, 2011; Saiz et al, 2006). Sendo assim, seguidamente serão descritos os seguintes trabalhos:

- i. Avaliação do ciclo de vida comparativa de coberturas verdes e convencionais localizadas no centro de Madrid (Espanha), (Saiz et al, 2006);
- ii. Estudo de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) de cubículos com coberturas verdes extensivas localizadas em Puigverd de Lleida (Espanha), (Baena, 2012);
- iii. Impacte no desempenho energético dos edifícios (2 casos de estudo) (*non LCA based*) (Jaffal et al, 2012);
 - a. Comparação entre uma cobertura convencional e uma cobertura verde extensiva numa casa unifamiliar em La Rouchelle (França), (*non LCA based*);
 - b. Comparação de casa unifamiliar em La Rouchelle (França) com outros dois tipos de clima – Atenas e Estocolmo, (*non LCA based*).
- iv. Edifícios de escritórios em Atenas (Grécia): potencial para adaptação de coberturas existentes, (*non LCA based*) (Nichaou et al, 2001);
- v. Simulação energética de coberturas verdes (Rocha e Silva, 2014), baseada na Avaliação experimental do comportamento térmico de coberturas verdes (Valadas, 2014), localizadas em Lisboa, (*non LCA based*).

Tabela 2.2 - Estudos de LCA (e *non LCA-based*) de coberturas verdes extensivas publicados e aplicados no sector da construção de edifícios.

Referência	BMCC	Comentários	Conteúdo	País	Ano
Baena	x		Estudi d'anàlisi de cicle de vida de cubicles amb coberta vegetada	Espanha	2012
Bianchini et al.	x		How "green" are the green roofs? Lifecycle analysis of green roof materials.	Canadá	2012
Blackhurst et al.	x	escala urbana	Cost-effectiveness of green roofs.	EUA	2010
Carter & Keeler	x	escala urbana	Life-cycle cost-benefit analysis of extensive vegetated roof systems.	EUA	2008
Castleton et al.	x	revisao lit.	Green roofs: building energy savings and the potential for retrofit.	Reino Unido	2010
		<i>LCA/non LCA</i>			
Getter et al.	x	<i>non LCA</i>	Carbon sequestration potential of extensive green roofs.	EUA	2009
Jaffal et al.	x	<i>non LCA</i>	A comprehensive study of the impact of green roofs on building energy performance	França	2012
Kosareo et al.	x		Comparative environmental life cycle assessment of green roofs	EUA	2006
Niachou et al.	x	<i>non LCA</i>	Analysis of the green roof thermal properties and investigation of its energy performance	Grécia	2001
Ottelé et al.	x		Comparative life cycle analysis for green façades and living wall systems.	Holanda	2011
Pérez et al.	x	<i>non LCA</i>	Use of rubber crumbs as drainage layer in green roofs as potential energy improvement material	Espanha	2012
Rocha e Silva	x	<i>non LCA</i>	Simulação energética de coberturas verdes	Portugal	2014
Sailor	x		A green roof model for building energy simulation programs.	EUA	2008
Saiz et al.	x		Comparative life cycle assessment of standard and green roofs	Espanha	2006
Santamouris et al.	x	<i>non LCA</i>	Investigating and analysing the energy and environmental performance of an experimental green roof system installed in a nursery school building in Athens, Greece.	Grécia	2007
Valadas	x	<i>non LCA</i>	Avaliação experimental do comportamento térmico de coberturas verdes	Portugal	2014
Wong et al.	x	<i>non LCA</i>	Life cycle cost analysis of rooftop gardens in Singapore.	Singapore	2003

Materials de construção e combinações de componentes (BMCC - building materials and component combinations); Todo o processo de construção (WPC - whole process of the construction).

i. Avaliação do ciclo de vida comparativa de coberturas verdes e convencionais localizadas no centro de Madrid (Espanha)

Os benefícios ambientais oferecidos por coberturas verdes têm sido amplamente estudados recorrendo à metodologia de ACV. Numa listagem de estudos de ACV publicados para BMCC e WPC (Ortiz et al. 2008) pode-se encontrar uma avaliação do ciclo de vida comparativa de coberturas verdes e convencionais localizadas no centro de Madrid e realizada por Saiz et al. (2006). Os impactes ambientais analisados nessa compilação de casos de estudo foram os seguintes: GW, potencial de aquecimento global; OD, criação fotoquímica de ozono; WC, consumo de água; DA, depleção de recursos abióticos; A, acidificação; HT, toxicidade humana; W, criação de resíduos; CE, ecotoxicidade; E, eutrofização; EL, o consumo de energia; RS, o consumo de recursos; O, outros; AR, emissões atmosféricas.

Neste caso de estudo, a Avaliação do Ciclo de Vida é utilizada para avaliar os benefícios, principalmente da redução do consumo de energia, resultante da adição de uma cobertura verde a um edifício residencial de 8 pisos, em Madrid. Foram analisados os seguintes 7 impactes ambientais, tendo em conta que estão incluídos na categoria BMCC (materiais de construção e combinações de componentes): GW, potencial de aquecimento global; A, acidificação; E, eutrofização; OD, criação fotoquímica de ozono; HT, toxicidade humana; WC, consumo de água; W, criação de resíduos.

Simulando a utilização de energia do edifício e realizando uma ACV da "base para o topo" e assumindo uma vida útil do edifício de 50 anos, Saiz et al. (2006) concluíram o seguinte:

- A propriedade fundamental de uma cobertura verde é a sua baixa absorção solar, causa de uma temperatura inferior da sua superfície, que reduz o fluxo de calor através da cobertura. A poupança anual de energia é pouco mais de 1%, mas a carga de arrefecimento de Verão é reduzida em mais de 6%, com reduções na hora de pico e nos andares superiores a chegarem aos 25%.
- Ao substituir uma cobertura plana comum por uma cobertura verde, os impactes ambientais são reduzidos entre 1,0 e 5,3%. Reduções semelhantes podem ser conseguidas através de uma cobertura "branca" com isolamento térmico adicional para o Inverno, mas reduções mais substanciais seriam alcançadas se a utilização comum de coberturas verdes levar a reduções na ilha de calor urbano (ICU).
- Os impactes do ciclo de vida podem mudar se coberturas verdes forem comumente utilizadas em edifícios em toda a cidade, levando assim a uma redução da ilha de calor urbano (ICU). Estudos em Toronto sugerem que uma diminuição de 1° C na temperatura seria obtida num terço da cidade se 50 % dos edifícios tivessem coberturas verdes e, pelo menos, 3 % das coberturas verdes estivessem totalmente saturadas. Assumindo-se que um efeito semelhante pode ser obtido em Madrid, a carga de arrefecimento de Verão do edifício (para temperaturas superiores a 23°C) seria reduzida em 33 %, levando a consequentes reduções nos impactes do ciclo de vida. Assim, o efeito das coberturas verdes na redução das ilhas de calor urbanas pode ser considerável e exige uma análise mais aprofundada.

ii. Estudo de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) de cubículos com coberturas verdes extensivas em Puigverd de Lleida (Espanha)

Recentemente, Baena (2012) desenvolveu um projeto que estuda novas soluções construtivas para melhorar a eficiência energética de edifícios existentes. Para estudar e obter resultados verídicos utilizaram-se quatro cubículos reais, localizados

em Puigverd de Lleida (Espanha), todos com as mesmas dimensões interiores e idênticas soluções construtivas de fachada, mas com diferentes soluções de cobertura (duas são coberturas planas verdes com diferentes tipos de drenagem, a terceira é uma cobertura plana convencional não transitável e a quarta é uma solução construtiva considerada de referência para efeitos de comparação). Foi realizada uma ACV dos 4 cubículos, sendo os impactos ambientais medidos por meio do indicador de impacto ecológico *Eco-Indicator 99 (EI99)*, utilizando a base de dados *EcoInvent 99* (Ecoinvent data v2.1.).

Os projetistas necessitam de utilizar parâmetros para medir o impacto ambiental de um material ou processo. Um *eco-indicador* consiste numa pontuação ou valor que expressa a carga ambiental total de um material ou processo num simples número. A ponderação (*weighting*) é o passo considerado mais controverso da avaliação de impacto do ciclo de vida. A etapa de ponderação do *Eco-Indicator 99* é realizada por um painel, num procedimento cuidadoso e tão simples, quanto possível.

No relatório disponível *online* designado *The eco-indicator 99: A damage oriented method for life cycle impact assessment: Methodology report.*, Goedkoop (2001) descreve esta metodologia de avaliação de impacto. De acordo com o autor e com a ISO 14040 e 14042, a Avaliação de Impacte do Ciclo de Vida (*LCIA: Life Cycle Impact Assessment*) é essencialmente destinada a melhorar a compreensão dos resultados da fase de inventário do ciclo de vida. Acrescentando que, até agora, muitas metodologias foram sugeridas e descritas, o autor considera que estas podem ser divididas em métodos orientados para temas e métodos orientados para danos.. A primeira categoria converte os resultados do inventário numa série de temas (Heijungs et al, 1992; Hauschild et al, 1998); a segunda modela os danos causados pelos resultados do inventário. O antecessor do projeto *Eco-Indicator 99*, a metodologia *Eco-Indicator 95* representa um exemplo baseado numa abordagem de danos (Goedkoop et al. 2001), aperfeiçoada entre 1997 e 1999 por um grupo de especialistas. O estudo foi patrocinado pelo governo da Holanda, como parte da sua política ambiental.

Neste caso de estudo foram analisados os seguintes impactos ambientais: Acidificação e eutrofização; Ecotoxicidade; Ocupação de terra; Carcinogénico; Alterações Climáticas; Radiações ionizantes; Destruição da camada de ozono; Efeitos respiratórios; Combustíveis fósseis; Extracção de minerais.

iii. **Impacte no desempenho energético dos edifícios (2 casos de estudo), *non LCA based***

As perdas e ganhos de calor pelas coberturas de edifícios assumem um papel particularmente importante (Gonçalves e Graça, 2004, citados por Raposo, 2013), considerando que a percentagem de área de cobertura relativamente aos restantes elementos construtivos é um fator relevante: o potencial de poupança energética dum edifício com cobertura verde em relação a outro com uma cobertura convencional revela-se mais significativo para edifícios baixos do que para edifícios altos. Para edifícios mais altos, a partir do 3º piso abaixo da cobertura não se verificam poupanças adicionais, sugerindo que as poupanças energéticas que derivam das coberturas verdes só serão efetivas nos últimos pisos. (estudos de Alcazar e Bass (2005) e Martens e Bass (2006)). Nesse sentido, como resultado da pesquisa efetuada, são apresentados vários casos de estudo *non LCA based*, focados no impacto no desempenho energético de edifícios localizados em diferentes regiões climáticas: i) La Rouchelle (França): clima temperado oceânico; ii) Atenas (Grécia): clima temperado mediterrânico; iii) Estocolmo (Suécia): clima continental húmido

a. **Comparação entre uma cobertura convencional e uma cobertura verde extensiva numa casa unifamiliar em La Rouchelle (França), *non ACV based***

Segundo Raposo (2001), no sentido de estudar o impacto das coberturas verdes no desempenho energético dos edifícios, Jaffal et al. (2012) realizaram uma comparação entre uma cobertura convencional e uma cobertura verde (tipologia extensiva com variedades *sedums* e sistema de irrigação) numa casa unifamiliar situada em La Rouchelle (França).

Jaffal et al. (2012) consideraram um clima temperado oceânico (Classificação climática de Köppen-Geiger: Cfb) e as temperaturas de referência de 19°C e 28°C para Inverno e Verão, respectivamente:

- Na cobertura convencional, as amplitudes térmicas na estrutura de suporte variam entre -6°C no Inverno e 58°C no Verão; a cobertura verde permite manter as amplitudes térmicas na estrutura de suporte entre 4°C e 20°C, durante o Inverno; no Verão, em comparação com a cobertura convencional, as temperaturas na estrutura suporte sofrem uma redução até 30°C.

- No Verão, o efeito de arrefecimento passivo é três vezes mais eficiente com uma cobertura verde; no Inverno, durante os dias mais frios, verificaram-se menores perdas de calor, no entanto nos dias mais quentes as perdas de calor aumentaram.
- Durante o Verão, a temperatura do ar interior diminuiu 2°C e as necessidades energéticas anuais diminuíram 6%.
- Os efeitos benéficos da cobertura verde na redução da temperatura do ar interior no Verão e na redução das necessidades de arrefecimento e de aquecimento dependem muito do nível de isolamento térmico na cobertura.

Analisando a Tabela 2.3, verifica-se que estes sistemas construtivos são termicamente mais vantajosos na adaptação de edifícios existentes do que na construção de edifícios novos, por apresentarem benefícios mais significativos quando aplicados em edifícios sem isolamento ou com isolamento moderado (Raposo, 2011).

Tabela 2.3 – Média e máxima temperatura do ar interior. Necessidades de energia para aquecimento e arrefecimento em La Rouchelle para diferentes espessuras de isolamento térmico (adaptado de Jaffal et al, 2012 in Raposo, 2013).

Isolamento (cm)	Temp. média (°C)		Temp. máxima (°C)		Energia Aquecimento (kWh /m ² /ano)		Energia Arrefecimento (kWh /m ² /ano)		Energia total (kWh /m ² /ano)	
	(1)	(2)	(1)	(2)	(1)	(2)	(1)	(2)	(1)	(2)
0	29,3	22,8	33,8	24,5	133,6	69,8	7,0	0,0	140,6	69,8
5	28,4	25,4	30,1	27,1	45,6	43,0	2,5	0,0	48,1	43,0
10	28,4	26,4	30,0	28,0	36,0	36,1	2,5	0,1	38,5	36,2
15	28,4	26,9	30,0	28,5	32,4	32,8	2,5	0,4	34,9	33,2
20	28,4	27,1	30,0	28,8	30,5	31,0	2,5	0,7	33,0	31,7
25	28,4	27,4	30,0	29,0	29,3	29,8	2,5	0,9	31,8	30,7
30	28,4	27,5	30,0	29,1	28,5	29,0	2,5	1,1	31,0	30,1

(1) Cobertura convencional; (2) Cobertura verde

b. Comparação de casa unifamiliar em La Rouchelle (França) com outros dois tipos de clima –Atenas e Estocolmo: *non LCA based*

O mesmo estudo, através dos dados apresentados na Tabela 2.4 seguinte, faz ainda uma comparação com outros dois tipos de clima, constatando Jaffal et al. (2012) que a eficiência das coberturas verdes depende muito do clima: i) clima temperado mediterrânico de Atenas (Classificação climática de Köppen-Geiger: Csa); ii) clima continental húmido de Estocolmo (Classificação climática de Köppen-Geiger: Dfb) .).

Tabela 2.4 - Média e máxima temperatura do ar interior. Necessidades de energia para aquecimento e arrefecimento em Atenas, La Rouchelle e Estocolmo (adaptado de Jaffal et al, 2012 in Raposo, 2013)

Cidade	Temp. média (°C)		Temp. máxima (°C)		Energia Aquecimento (kWh /m ² /ano)		Energia Arrefecimento (kWh /m ² /ano)		Energia total (kWh /m ² /ano)	
	(1)	(2)	(1)	(2)	(1)	(2)	(1)	(2)	(1)	(2)
Atenas	33,9	31,3	35,4	32,7	14,1	15,2	26,4	12,5	40,5	27,7
La Rouchelle	28,4	26,4	30,1	28,0	36,0	36,1	2,5	0,1	38,5	36,2
Estocolmo	25,6	24,2	27,2	25,8	131,0	120,3	0,0	0,0	131,0	120,3

(1) Cobertura convencional; (2) Cobertura verde

Em conclusão, Raposo (2011), tendo em consideração Jaffal et al. (2012), considera que a melhoria do conforto térmico e a redução das necessidades de arrefecimento são mais eficazes nos climas quentes. No entanto, refere que uma redução significativa das necessidades de aquecimento pode ser observada no clima mais frio. O dado relevante resulta da possibilidade de aumento das necessidades de aquecimento nos climas quentes, mas esse aumento é menor quando comparado com a redução das necessidades de arrefecimento. De uma forma geral, as coberturas verdes reduziram as necessidades totais de energia nos três tipos de clima estudados – quente, temperado e frio. Verificaram-se reduções de 32% (12,8 kWh /m²/ano) no clima mediterrânico (quente) de Atenas, de 6% (2,3 kWh /m² /ano) no clima temperado de La Rouchelle, e de 8% (10,7 kWh /m² /ano) no clima frio de Estocolmo.

iv. Edifícios de escritórios em Atenas (Grécia): potencial para adaptação de coberturas existentes, *non LCA based*

Também segundo Raposo (2013) e Castleton et al. (2010), fazendo referência ao estudo de Nichaou et al. (2001) sobre a influência das coberturas verdes na poupança energética dos edifícios e no potencial para reabilitação, concluiu-se que os edifícios mais antigos são geralmente pior isolados termicamente e que, com a instalação duma cobertura verde, se verificam mais poupanças do que em edifícios novos (Tabela 2.5). Os autores consideram que, para fazer a diferença ao

nível da quantidade de energia utilizada na construção e no combate às alterações climáticas, devido aos processos de construção bastante demorados, os edifícios existentes podem ser adaptados com coberturas verdes. .

Tabela 2.5 - Potencial para poupança energética de uma cobertura verde em coberturas sem isolamento, isolamento moderado e isolamento forte, em edifícios de escritórios em Atenas (Grécia), verificados por Nichaou et al. (2001); adaptado de Castleton et al. 2010 in Raposo, 2013)

Tipo de isolamento	Valor – U, sem cobertura verde (W/m ² K)	Valor – U, com cobertura verde (W/m ² K)	Poupança anual de energia de aquecimento (%)	Poupança anual de energia de arrefecimento (%)	Poupança anual de energia total (%)
Isolamento forte	0,26 – 0,4	0,24 – 0.34	8 – 9	0	2
Isolamento moderado	0,74 – 0,8	0,55 – 0.59	13	0 – 4	3 – 7
Sem isolamento	7,76 – 18,18	1,73 – 1.99	45 – 46	22 – 45	31 – 44

U – Coeficiente de Transmissão Térmica Superficial

v. **“Simulação energética de coberturas verdes” (Rocha e Silva, 2014), baseada na “Avaliação experimental do comportamento térmico de coberturas verdes” (Valadas, 2014), localizadas em Lisboa, (non LCA based)**

Estes casos de estudo são analisados em detalhe no Capítulo 3.3.3. Relativamente à energia operacional é feita uma análise dos resultados das duas teses de mestrado acima citadas, a qual serve de base à presente ACV.

Importa realçar outros dois estudos realizados por Getter et al. (2009), cujo objetivo era quantificar o potencial de armazenamento de carbono de coberturas verdes extensivas e o efeito da seleção de espécies na acumulação de carbono. O primeiro foi realizado em oito coberturas em Michigan e o segundo em quatro coberturas em Maryland,. Todas as 12 coberturas verdes eram compostas principalmente por espécies *Sedum*, tendo profundidades de substrato compreendidas entre de 2,5 a 12,7 cm. No Capítulo 4.1.2.2. (Cenário B: ii. Sequestro de carbono de coberturas verdes extensivas) são analisados detalhadamente os estudos anteriormente citados, os quais servem de base à presente ACV.

Para finalizar, a análise dos materiais constituintes de coberturas verdes realizada por Bianchini et al. (2012) demonstrou que estes são produtos sustentáveis no longo prazo. Em geral, a poluição do ar devido ao processo de produção de polímeros pode ser amortizada por coberturas verdes num período de 13 a 32 anos. No entanto, os processos de fabrico do polietileno de baixa densidade e do polipropileno têm muitos outros impactes negativos para o ambiente, além da poluição do ar. Segundo os autores, é evidente que os atuais materiais de coberturas verdes precisam de ser substituídos por produtos mais ecológicos e sustentáveis.

2.4.4. Ferramentas de ACV

Uma variedade de ferramentas de software e bases de dados relacionadas com a indústria da construção fornecem modelos padronizados de avaliação e dados de inventário em múltiplas escalas que variam desde dados globais, dados setoriais da indústria até dados de produtos (Singh et al, 2011; Haapio et al, 2008; Spatari et al, 2000; citados por Cabeza et al, 2013).

Segundo Haapio et al. (2008), o campo de ferramentas de avaliação ambiental de edifícios é vasto, tendo estas sido desenvolvidas por diversos institutos e para fins diferentes. O papel emergente das ferramentas de avaliação ambiental de edifícios incentiva a discussão do conteúdo, do quadro das diferentes ferramentas e também do contexto em que se inserem. Esta discussão requer a categorização das ferramentas, existindo dois bem conhecidos sistemas de classificação de ferramentas de avaliação ambiental de edifícios: um foi desenvolvido pelo *ATHENA Institute* (Trusty, 2000), outro pela IEA Annex 31 (2001).

2.4.4.1. Sistema de classificação ATHENA

O Instituto ATHENA introduziu um sistema de classificação *Assessment Tool Typology* (Trusty, 2000) (designado posteriormente por classificação ATHENA), composto por 3 níveis (Tabela 2.6). No primeiro nível situam-se as ferramentas de comparação de produtos e fontes de informação.; no segundo, as ferramentas de apoio à decisão do edifício na sua totalidade; no terceiro as *frameworks* e sistemas avaliação do edifício na sua totalidade.

Tabela 2.6 - Sistema de classificação de 3 níveis para ferramentas relacionadas com ACV: “Assessment Tool Typology” designado posteriormente por classificação ATHENA, (adaptado de Trusty e Horst, 2005).

Níveis	Ferramentas	Developer
Nível 1 - ferramentas de comparação de produtos e fontes de informação.	BEES	Building and fire research laboratory, BFRL, BEES 3.0.
	National Renewable Energy Laboratory's (NREL) U.S. Life-Cycle Inventory (LCI) Database	Golden CO, U.S. Life cycle inventory (LCI) database, ver. 1.6.0. .
	SimaPro	PRé Consultants, SimaPro. Amersfoort, The Netherlands
	GaBi, Ganzheitliche Bilanzierung Integrated Assessment	PE Int'l, GaBi.
	Life Cycle Explorer.	Norris and Yost (2001)
Nível 2 - ferramentas de apoio à decisão do edifício na sua totalidade.	Athena Eco- Calculator	Athena Institute, EcoCalculator. Ontario, Canada.
	Envest 2	BRE Group. Envest 2. Watford, UK.
	LCA in Sustainable Architecture	Billiton Technology BHP; 2012. LISA (LCA in Sustainable Architecture).
Nível 3 - <i>frameworks</i> e sistemas avaliação do edifício na sua totalidade.	Athena Impact Estimator	
	BRE environmental assessment method	BRE Group. BREEAM. Watford, UK.
	LEED rating system	Council, U.S.G.B.; 2008. LEED rating systems.

Com base no sistema de classificação ATHENA, Cabeza et al. (2014), citando vários autores, fazem uma análise das ferramentas de ACV e bases de dados relacionadas com a indústria da construção. Norris e Yost (2001), citados Cabeza et al. (2014), estabelecem uma clara distinção entre ferramentas de *nível 1*, umas focadas na seleção de materiais construção e as outras, verdadeiras ferramentas de modelação do inventário do ciclo de vida (*LCI: Life Cycle Inventory*). As últimas oferecem mais transparência entre resultados do modelo e dados de *input* do que os sistemas de seleção de materiais de construção de edifícios.

Erlandsson e Borg (2003) notam que a maioria das ferramentas de ACV (*BEES, Athena, EcoQuantum e Building Environmental Assessment Tool (BEAT)*) contêm uma abordagem *bottom-up* – o *software* começa nos próprios materiais de construção, assumindo que a fase de concepção já teve lugar. Apenas o sistema Envest 2 tem uma abordagem “de cima para baixo”, começando com a forma do edifício, e movendo-se de seguida através das especificações de materiais até aos detalhes da construção.

O recente *Athena EcoCalculator* tem uma abordagem mais orientada para projeto, especificação de materiais e processos de construção de edifícios, permitindo que os utilizadores visualizem no projeto, os impactes resultantes das mudanças na especificação dos materiais.

BEES é uma ferramenta de especificação de materiais de edifícios utilizada nos EUA, fornecendo um pacote de avaliação económica e ambiental integrada para uma variedade de materiais de construção “pré-carregados”. Os utilizadores atribuem pesos funcionais às porções ambientais e económicas da análise, assim como a uma variedade de categorias de danos. Por sua vez, estes esquemas de ponderação influenciam a pontuação de desempenho fornecida pelo software. BEES inclui duas características desejáveis: a inclusão da análise económica integrada e uma categoria de danos da qualidade do ar interior. A falta de transparência pode ser considerada como um lacuna da BEES. Uma pesquisa de utilizadores BEES identifica que construtores, projetistas e entidades governamentais acham que as ferramentas ACV que exigem menos *inputs* de peritos são mais fáceis de utilizar (*user friendly*), enquanto que 82% dos entrevistados valorizam a transparência numa ferramenta de ACV (Hofstetter, 2002).

GaBi é um modelo baseado em processos, desenvolvido na Universidade de Stuttgart (Alemanha), o qual permite avaliações do ciclo de vida que são *ISO 14040-compliant* (PE Int'l, GaBi.). Utiliza uma base de dados de produtos integrada que foi desenvolvida através de revisões da indústria e bibliografia técnica. A integração do custo económico é incorporada neste pacote de *software*.

Outras ferramentas genéricas de *nível 1* que também contêm informação sobre os materiais de construção comuns, incluem *SimaPro* da Holanda e *Tool for Environmental Analysis* (TEAM) de França (PRé Consultants; Ecobilan, 2001). *Athena EcoCalculator* considera as componentes de todo o edifício, reconhecendo que alterações na especificação de um material do edifício podem ter implicações noutros materiais associados. Esta ferramenta também aborda duas limitações adicionais de outras ferramentas de ACV: a disponibilidade de dados do inventário do ciclo de vida e o estabelecimento de valores de referência para medir o desempenho do edifícios (Trusty, 2005). A questão da disponibilidade de dados de LCI foi abordada através da criação de um banco de dados norte-americano dentro do aplicativo. O banco de dados foi desenvolvido por meio de uma parceria público-privada, tendo sido estabelecidos casos de estudo regionais e nacionais, no sentido de fornecer valores de referência.

Invest 2 consiste numa ferramenta de projeto baseada no ciclo de vida de edifícios, permitindo a um analista examinar *trade-offs* ambientais e financeiros, bem como os impactes durante o processo do projeto do edifício (*BRE Group*). Inicialmente, os projetistas introduzem dados relativos à altura do edifício, área de janelas, e componentes exteriores tais como paredes e coberturas. O *software* seleciona esses componentes com os respectivos impactes económicos e ambientais globais otimizados para que o analista possa fazer *trade-offs* durante a fase de concepção. O modelo inclui explicitamente dados da fase de utilização do edifício, incluindo reparação, manutenção e substituição.

Norris e Yost (2001) discutem o *software Life-Cycle Explorer* (LCE), parcialmente concebido para resolver 2 desafios específicos da ACV da construção - aspectos da fase de utilização dos materiais de construção de edifícios que podem ser específicos do contexto; resultados de ACV baseados na vida útil dos materiais de construção. Os autores propõem o protótipo do modelo LCE através duma aplicação de caso de estudo. Pontos fortes do *software* LCE incluem a capacidade de fazer comparações de produtos e de incorporar parâmetros e modelo de incerteza na análise.

LISA é uma ferramenta de apoio à decisão livremente disponível de ACV simplificada para construção, tendo sido desenvolvida na Austrália. O site LISA (LISA, 2012) enumera uma série de casos de estudo de ACV de edifícios utilizando este *software*.

ECO-BAT (HEIG-VD, 2012) é outra ferramenta de *software* disponível para a realização de ACV de edifícios, contendo informações de LCI de mais de 100 materiais de construção genéricos, extraídas da base dados da *Ecoinvent Data*. Os utilizadores podem definir os seus edifícios, especificando um perfil de *mix* energético para aquecimento, arrefecimento e ventilação.

O modelo EIO-LCA da *Carnegie Mellon University* (ferramenta *online*), embora não tenha sido especificamente concebido para a indústria da construção civil, tem sido utilizado em avaliações do ciclo de vida de edifícios e processos de construção, através da aproximação dos impactes ambientais de vários *inputs* a partir das correspondentes médias de sector industrial (O'Brien et al, 2006; Ochoa Franco, 2004).

Da mesma forma, o *software* MIET 2.0, desenvolvido na Universidade de Leiden, é uma ferramenta de análise de *input-output* genérica que permite ACV híbrido em vários níveis (*tiered hybrid LCA*). Versões recentes do *software* disponível no mercado, como o *SimaPro*, também permitem a realização de ACV híbrido, combinando dados do processo e dados de *input-output*. As bibliotecas de dados *SimaPro* incluem dados de *input-output* de uma série de países, incluindo os EUA, Japão e Dinamarca (PRé Consultants).

Em Portugal, Silvestre et al. (2013) consideram que a avaliação da sustentabilidade de um edifício deve representar parte de uma avaliação integrada do desempenho do edifício. O envelope é uma das principais partes dos edifícios e as paredes exteriores influenciam diretamente o seu desempenho térmico e ambiental, devido ao seu peso considerável na energia incorporada inicial, consumo de energia no ciclo de vida do e custo do ciclo de vida. O trabalho recentemente apresentado pelos autores propõe uma abordagem para fornecer a avaliação do ciclo de vida ambiental, energética e económica do "berço ao berço" (3E-C2C) de componentes de edifícios e exemplifica sua aplicação no processo de seleção da parede externa de um edifício. A abordagem 3E-C2C foi desenvolvida seguindo as orientações já incluídas em projectos de normas europeias (*European draft standards*) para a avaliação da sustentabilidade de edifícios e produtos de construção, na sua versão final, no início de 2012. O desempenho ambiental das soluções de paredes exteriores foi comparado, partindo de "cradle to cradle" e seguindo uma metodologia de "avaliação do ciclo de vida". O desempenho energético considerado na abordagem 3E-C2C corresponde à estimativa de consumo de energia para aquecimento e arrefecimento durante o

funcionamento de um edifício e o módulo económico baseia-se na metodologia de custo do ciclo de vida (*Whole-Life Cost*). A abordagem 3E custo-C2C complementa a 3E-C2C e fornece uma unidade comum livre de subjetividade para comparação de diferentes alternativas no projeto de um edifício, utilizando um "Método de Avaliação de Impacte Ambiental" com um passo de ponderação (que converte os resultados de todas as categorias de impacte numa unidade económica). Este procedimento permite a adição do custo associado aos impactes ambientais ao custo de ciclo de vida económica e energética e permite a seleção de alternativas (mesmo que elas não sejam funcionalmente equivalentes), considerando todos os indicadores de desempenho relevantes em todas as fases críticas do ciclo de vida.

2.4.4.2. Sistema de classificação IEA Annex 31

O *Annex 31* examina como as ferramentas e metodologias de avaliação do ciclo de vida (ACV) e de energia poderão ser utilizadas na redução do impacte relacionado com a energia de edifícios em ambientes interiores, locais e globais. *Annex 31* é um projeto criado sob os auspícios da *International Energy Agency's (IEA) Energy Conservation in Buildings and Community Systems Programme*. Como a necessidade de responder às preocupações ambientais (p.e., esgotamento de recursos e emissões de gases de efeito estufa) se tornou premente, os conceitos, ferramentas, casos de estudo e considerações de ordem prática do *Annex 31* representam um recurso de informação inestimável. O relatório disponível no *website* contém os resultados do projeto *Annex 31 Energy-Related Environmental Impact of Buildings* e baseia-se nas conclusões dos 14 países participantes na pesquisa efetuada. O relatório inclui um diretório de ferramentas atuais (IEA Annex 31, 2001), uma descrição da teoria de ferramentas, bem como métodos e relatórios de investigação sobre a *performance* das ferramentas. Os relatórios *Annex 31* podem ser de interesse para os utilizadores de ferramentas, para grupos envolvidos no *design* de ferramentas e para quem que estabeleça políticas e diretrizes para a promoção de uma melhor tomada de decisão no sector da construção de edifícios. No projeto *IEA Annex 31 Energy related environmental impact of buildings*, as ferramentas de avaliação são classificadas em 5 classes (IEA Annex 31, 2001), sendo este sistema de classificação combinado com o sistema de classificação ATHENA (Haapio et al. 2008):

Ferramentas interativas (ferramentas de software interativas fornecem métodos de cálculo e de avaliação que permitem ao utilizador ou decisor tomar uma abordagem pró-ativa (para explorar uma gama de opções numa forma interativa), (IEA Annex 31, 2001; Baldwin et al., 2000)):

1. Software de Modelação de Energia.
2. Ferramentas de ACV Ambiental para Edifícios e *Stocks* de Edifícios:
 - a. Nível 1: BEES 3.0 and TEAM™
 - b. Nível 2: ATHENA™, BEAT 2002, BeCost, Eco-Quantum, Envest 2, EQUER, LEGEP® e PAPOOSE
 - c. Nível 3: EcoEffect and ESCALE

Ferramentas passivas: (ferramentas passivas apoiam a tomada de decisão, mas não permitem interação com o utilizador (IEA Annex 31, 2001; Baldwin et al., 2000)):

3. Frameworks de Avaliação Ambiental e Sistemas de Rating:
 - a. Nível 3: BREEAM, EcoProfile, Environmental Status Model and LEED®
4. Diretrizes Ambientais ou *Checklists* para Projeto e Gestão de Edifícios.
5. Declarações Ambientais de Produtos (EPD: Environmental Product Declarations), Catálogos, Informação de Referência, Certificações e Etiquetas.

Haapio et al. (2008) referem que o *Environmental Status Model* não foi mencionado no IEA Annex 31 (2001), tendo sido classificado com base na semelhança com as outras ferramentas. O foco da pesquisa desenvolvida por estes autores incidiu sobre as ferramentas da segunda e terceira categoria de classificação do *IEA Annex 31*, que distingue dois tipos de ferramentas: *software* Interativo e ferramentas passivas. As ferramentas da primeira e segunda categoria são ferramentas interativas, enquanto que as ferramentas da terceira, quarta e quinta categoria são ferramentas passivas.

Na classificação *ATHENA* o foco incide nas ferramentas de avaliação. As ferramentas são classificadas em diferentes níveis, dependendo do processo de avaliação e da finalidade para que são utilizadas (Trusty, 2000). Além das ferramentas de avaliação, o *IEA Annex 31* inclui *software* de modelação de energia, diferentes diretrizes ambientais, *checklists*, declarações ambientais de produtos e certificações. Consequentemente, o campo de ferramentas classificadas é muito mais amplo na classificação IEA Annex 31 do que na classificação *ATHENA*. Todas as ferramentas classificadas em *ATHENA* pertencem à segunda ou terceira categoria na classificação *IEA Annex 31*.

As ferramentas de avaliação são soluções para implementação de métodos de avaliação e de cálculo, sendo muitas vezes utilizadas na fase de projeto para auxiliar no planeamento e apoiar a tomada de decisão. Todas as 13 ferramentas incluídas no estudo de Haapio et al. (2008) são ferramentas de avaliação e três quartos delas podem ser utilizadas como ferramentas de planeamento (*níveis 1 e 2*, e também *EcoProfile* e *ESCALE* do *nível 3*). A maioria das ferramentas de avaliação ambiental de edifícios são programas de *software*, mas a sua variedade é grande. Os autores também consideram que quanto mais avaliação e cálculo estiveram incluídos na ferramenta, mais dependente esta será da tecnologia de informação: IEA Annex 31 (2001) distingue *software* interativo e ferramentas passivas, sendo as primeiras mais dependentes da tecnologia da informação do que as últimas; na classificação *ATHENA*, ferramentas dos *níveis 1 e 2* são mais dependentes da tecnologia da informação do que ferramentas de *nível 3*.

Apenas algumas das ferramentas incluem a análise de custo do ciclo de vida (LCCA) (Haapio et al. 2008). A LCCA é realizada com diferentes níveis de precisão dentro das ferramentas. *Envest 2*, por exemplo, fornece uma análise de custo do ciclo de vida (whole life cost analysis), mas *BEAT* calcula apenas os custos que diferenciam as soluções sob consideração. Naturalmente, a LCCA pode ser calculada recorrendo a uma ferramenta separada, mas a combinação de resultados com os respeitantes à avaliação ambiental poderá ser difícil e demorada.

Com base no sistema de classificação *IEA Annex 31*, Haapio et al. (2008), citando vários autores, resumiram as ferramentas de avaliação ambiental desenvolvidas para o setor de edifícios, com enfoque na Europa e na América do Norte (apresentadas na lista anterior). Esta pesquisa abrangeu 16 diferentes ferramentas de avaliação ambiental de edifícios, sendo as ferramentas selecionadas bem conhecidas e representativas.

Os sistemas de classificação *ATHENA* e *IEA Annex 31* enfatizam o tipo e quadro das ferramentas de avaliação, mas estas também podem ser categorizadas pelos seus conteúdos e características. A classificação *ATHENA* foca-se nas ferramentas de avaliação. De acordo com Trusty (2000), a comparação de ferramentas deve ser feita dentro do nível de classificação da classificação *ATHENA* - ferramentas de *nível 1* devem ser comparadas apenas com outras ferramentas de *nível 1* e não com ferramentas de *nível 2* ou *3*. Categorizar ferramentas nas classificações *ATHENA* permite analisar as diferenças entre diferentes níveis e comparar ferramentas dentro desses níveis.

As ferramentas de avaliação ambiental variam em grande extensão, existindo uma variedade de diferentes ferramentas para componentes de edifícios, edifícios inteiros e *stocks* de edifícios. As ferramentas também cobrem diferentes fases do ciclo de vida de um edifício e consideram diferentes questões ambientais. Essas ferramentas são de nível global, nacional e, em alguns casos, de nível local. Algumas ferramentas nacionais podem ser utilizadas como ferramentas globais, alterando as bases de dados nacionais. As ferramentas de avaliação ambiental também são desenvolvidas para diferentes fins: investigação, consultoria, tomada de decisão e manutenção. Estas questões levam a diferentes utilizadores: projetistas, arquitetos, investigadores, consultores, proprietários, inquilinos e autoridades. Diferentes ferramentas também são utilizadas para avaliar edifícios novos e edifícios existentes. Além disso, o tipo de edifício (residencial ou escritórios) influencia a escolha da ferramenta de avaliação ambiental.

O papel emergente das ferramentas incentiva uma discussão mais profunda e isso requer a categorização das ferramentas. Ao categorizar as ferramentas, podem ser observadas as semelhanças e as diferenças entre elas e essa informação pode ser utilizada no seu desenvolvimento. Haapio et al. (2008) também categorizam as ferramentas de avaliação ambiental de edifícios da seguinte forma: **i)** edifícios avaliados; **ii)** utilizadores das ferramentas **iii)** fases do ciclo de vida; **iv)** bases de dados das ferramentas; **v)** formatos dos resultados obtidos.

2.5. NORMALIZAÇÃO E LEGISLAÇÃO

No Capítulo 2 foi apresentado o desenvolvimento e a aplicação da ACV na indústria em geral. A temática da normalização e da legislação também foi aí analisada, especialmente nas secções que distinguem os seguintes períodos: 1990-2000: década de normalização; 2000-2010: década de elaboração.

Pode-se acrescentar que, segundo Haapio et al. (2008), os setores industriais (incluindo o setor de edifícios) passaram a reconhecer o impacto das suas atividades sobre o meio ambiente, na década de 90. De acordo com os autores, significativas mudanças foram necessárias para mitigação do impacto ambiental do sector dos edifícios, o qual teve que se concentrar no modo de como os edifícios seriam projetados, construídos e utilizados - os *drivers* foram a política pública, e a crescente procura de mercado por produtos e serviços ambientalmente saudáveis. Tendo como objetivo a redução dos

impactes ambientais, foi necessário adotar uma bitola para medir o desempenho ambiental (Crawley e Aho, 1999). A definição específica do termo "desempenho do edifício" é complexa, uma vez que os diferentes actores do sector dos edifícios têm diferentes interesses e requisitos (Cole, 1998) - o desempenho económico, p.e. interessa a investidores, enquanto os inquilinos estão mais interessados em assuntos relacionados com a saúde e o conforto.

Também foram desenvolvidos Indicadores ambientais separados para satisfação das necessidades dos grupos de interesse relevantes. No entanto, a primeira tentativa real de estabelecer meios abrangentes para avaliar simultaneamente uma ampla gama de considerações ambientais em edifícios consistiu no *Building Research Establishment Environmental Assessment Method* (BREEAM) (Crawley & Aho, 1999), a primeira ferramenta de avaliação ambiental de edifícios disponível comercialmente, criada em 1990 no Reino Unido (Grace, 2000). Desde então, muitas outras diferentes ferramentas foram lançadas internacionalmente (DOE, 1996/2006; IEA Annex 31, 2001; Reijnders and van Roekel, 1999).

O desenvolvimento de diferentes ferramentas no sector dos e dos edifícios levou a que as diferentes organizações e grupos de pesquisa contribuíssem com novos conhecimentos ganhos através da experiência adquirida, tendo as ferramentas ganho considerável sucesso nos últimos anos (Haapio et al, 2008). No entanto, o sucesso das ferramentas de avaliação tem diminuído todos os outros mecanismos de formação consciência ambiental (Cole, 2005). A discussão sobre a sustentabilidade no setor dos edifícios ganhou fórum internacional. O *Green Building Challenge* (GBC), por exemplo, organizou várias conferências internacionais que contribuíram substancialmente para o desenvolvimento de sustentável dos edifícios. Atualmente, o foco expande-se em direção a países em desenvolvimento. Além disso, a *International Organization for Standardization* (ISO) tem sido ativa na definição de requisitos normalizados para a avaliação ambiental de edifícios, tendo a *ISO Technical Committee (TC) 59 "Building Construction"* e o seu *subcommittee (SC) 17 "Sustainability in building construction"* publicado duas especificações técnicas: i) *ISO/TS 21929-1:2006 sustainability in building construction — sustainability indicators — Part 1: Framework for development of indicators for buildings* (ISO, 2006a); ii) *ISO/TS 21931-1:2006 sustainability in building construction—framework for methods of assessment for environmental performance of construction works— Part 1: Buildings* (ISO, 2006b).

A nível europeu, o *Technical Committee (TC) 350 do European Committee for Standardization* (CEN/TC 350 - "Sustainability of Construction Works") desenvolve métodos padronizados horizontais e voluntários para a avaliação dos aspectos de sustentabilidade de obras de construção e normas para a declaração ambiental de produtos (EPD: *environmental product declaration*) da construção (CEN, 2005). O *Technical Committee (TC) 350* é constituído pelos seguintes grupos de trabalho: i) *WG 1 environmental performance of buildings - Framework for assessment of integrated building performance*; ii) *WG 2 building life cycle description - Assessment of environmental performance of buildings -calculation method*; iii) *WG 3 product level - Environmental product declaration - product category rules* (CEN, 2007).

A metodologia para identificar os níveis ótimos de desempenho de elementos de edifícios que incluem apenas os custos de construção e de energia é proposta na reformulação da *Energy Performance of Buildings Directive* (EC, 2010). Silvestre (2013) considera esta abordagem insuficiente, uma vez que ignora os aspectos ambientais do edifício na análise de ciclo de vida que conduz a um *cost-optimal level*. Sendo assim, qualquer abordagem metodológica de ACV deverá ter em consideração as orientações do projeto das normas europeias em fase de desenvolvimento pelo *CEN/TC 350 - Sustainability of Construction Works*. Estas normas para a avaliação da sustentabilidade de edifícios e produtos de construção foram estruturadas em três níveis horizontais (*framework*, edifício e produto) e em três colunas verticais (ambiental, social e económica), tendo em conta as características de desempenho técnico e funcional. Este sistema europeu harmonizado permitirá a avaliação do desempenho ambiental, social e económico de edifícios com base numa abordagem de ciclo de vida.

Na Europa, a certificação energética dos edifícios (European Commission, 2002) já teve consequências positivas, não só em termos do desempenho térmico dos edifícios. Segundo Silvestre (2013), em Portugal já é possível estabelecer uma relação direta entre a classe energética e a qualidade da construção. Com a minimização das emissões de carbono resultantes da exploração dos edifícios, as medidas de controle e redução dos impactes ambientais de toda a cadeia de produção da construção tornaram-se uma prioridade, considera o autor acrescentando que, por essa razão, é hora de começar a determinar a *carbon invoice* da produção de materiais de construção e da construção de edifícios (Machado, 2009) - assim que essa determinação tenha dados credíveis e estatisticamente significantes, a teórica "fatura de carbono" pode tornar-se num real imposto ambiental a ser aplicado a novas construções, podendo assim constituir um incentivo para a reabilitação de edifícios.

Silvestre (2013), citando vários autores, considera que mesmo que a indústria da construção europeia tenha como prioridade mais recente a eficiência energética, num futuro desejável será possível avaliar um edifício e realizar a sua certificação energética através de um balanço dos impactes ambientais dos seus materiais em todo o seu ciclo de vida. Para cumprir o princípio geral "da abordagem holística" da ISO 15392 (ISO, 2008), a avaliação da sustentabilidade de um edifício deve representar uma parte de uma avaliação de desempenho integrado do edifício (Ilomäki et al. 2008). Em Espanha, uma metodologia de ACV simplificada, já aqui descrita, foi proposta para ser incluída no processo de certificação energética de edifícios. Esse método utiliza as declarações ambientais de produtos de materiais de construção que já estão disponíveis (Zabalza et al. 2009) Na Itália, a necessidade de integrar indicadores quantitativos de avaliação de ciclo de vida no processo de certificação energética também foi identificada (Campioli et al, 2007).

2.6. ANÁLISE CRÍTICA

A Análise da Sustentabilidade do Ciclo de Vida (LCSA: *Life Cycle Sustainability Analysis*) é representada num quadro de visualização do ponto de vista do ciclo de vida para questões de sustentabilidade e apenas para fornecer respostas do ciclo de vida. A LCSA trabalha com uma infinidade de modelos disciplinares e guias e, dada uma específica questão de sustentabilidade, selecciona os mais adequados. Perante este quadro de LCSA, a questão que se coloca é a seguinte: *que abordagem será mais adequada para as coberturas verdes de tipologia extensiva?* Considerando as duas dimensões da LCSA, será realizada uma análise crítica, cujo principal objetivo consiste em obter uma resposta para a questão de sustentabilidade colocada (Figura 1 - *Road map* para a LCSA, Zamagni et al, 2009).

2.6.1. Objeto de análise (dimensão vertical)

A LCSA pode ser realizada a três diferentes níveis: produto, *meso* ou economia, sendo o primeiro nível - o qual compreende qualquer bem ou serviço - definido nas normas ISO 14040. Sistemas de produtos que desempenham a mesma de função (ou funções) também poderão ser comparados. O objeto de análise da presente dissertação - cobertura verde extensiva - enquadra-se no 1º nível como um "sistema de produtos" (*product-oriented technosystem*). No entanto, durante a pesquisa efectuada também foram seleccionadas 2 abordagens (Blackhurst et al, 2010; Carter & Keeler, 2008) situadas no 2º nível de análise (*meso*: um nível intermédio entre o produto e toda a economia), utilizando respectivamente as metodologias EIO-LCA (*Economic-input output life-cycle assessment*) e BCA (*Life-cycle cost-benefit analysis*) para unidades funcionais de análise à escala urbana de bairro ou cidade,

Batista (2004) considera que, em Portugal, apesar dos benefícios incontestáveis destas soluções construtivas, a adoção das coberturas verdes é ainda reduzida, talvez devido aos seguintes fatores: insuficiente consciencialização dos intervenientes sobre as suas vantagens; divulgação deficiente dos conhecimentos técnicos para a conceção e execução; oneroso acesso a produtos especializados e homologados; inexistência de regulamentação de edificações específicas; inexistência de incentivos fiscais que estimulem a adoção deste tipo de soluções; uma análise do custo global sob a ótica custo/benefício (BCA: *Life-cycle cost-benefit analysis*). Relativamente a este último fator, Gedge & Fritht (2004) considera que através de uma análise de custo/benefício poder-se-á obter uma perspectiva alargada dos efeitos do "enverdecimento" do topo dos edifícios, transformando, em primeiro lugar, os benefícios obtidos em equivalentes monetários, por forma a facilitar a persuasão de promotores interessados em investir neste tipo de mercado e, em segundo lugar, identificando o papel desses mesmos benefícios à escala urbana (*meso*).

Considerando esses benefícios à escala urbana, é de salientar que o novo Plano Diretor Municipal de Lisboa (PDM, 2012), publicado em 30 de agosto de 2012, é o plano dos 3 Rs: Reutilizar, Reabilitar, Regenerar e pretende aumentar a presença de áreas verdes e permeáveis nas coberturas de edifícios. Para atingir o objetivo de aumentar a eficiência ambiental, o novo PDM terá de aumentar as áreas verdes da cidade, procurando continuidade, especialmente nas áreas do vale; aumentar a presença de áreas verdes e permeáveis na cidade consolidada, sobretudo em espaços públicos, interior dos blocos e coberturas de edifícios; criar incentivos para a eficiência energética dos edifícios; adaptar a cidade para veículos eléctricos; criar incentivos para a reutilização de edifícios; criar incentivos para a reciclagem de materiais (o sétimo objetivo do novo PDM consiste em aumentar a eficiência ambiental, reduzindo o consumo de energia em 9,4%, água em 7,8%, materiais em 10%, aumentando as áreas verdes. O novo PDM aposta em incentivos para melhorar a eficiência ambiental da cidade, aumentando a recolha seletiva em 29% e a utilização de água reciclada para 3,1 m³/habitante/ano).

Seguindo uma abordagem exigencial de sistemas na fase de projeto e considerando o *subsistema* do sistema "edifício" - *cobertura verde extensiva plana de acesso limitado* - hierarquicamente dividido em vários *componentes* (**1**) estrutura de suporte da cobertura; **2**) revestimento da cobertura; **3**) sistema de drenagem de águas pluviais; o segundo é o objeto de

análise desta dissertação) e *elementos* (camadas funcionais: *layers*) (Kellenberger et al, 2009), são formuladas exigências funcionais/desempenho do sistema construtivo.(subsistemas do edifício e sua divisão, segundo a norma ISO 6241 (*Performance Standards in Building*)). Os elementos são produtos manufacturados como unidades distintas para servir uma função específica e podem ser constituídos por um ou vários materiais de construção

As exigências funcionais a ser formuladas dividem-se em 3 grupos (segurança, habitabilidade e adequabilidade ao uso). Uma cobertura verde consiste na adição de camadas de substrato vegetal e plantas a um sistema de cobertura convencional gerando um leque extenso e multidisciplinar de exigências funcionais, das quais interessa analisar as seguintes: “Integração com o ambiente” e “Conforto higrotérmico”. A integração com o ambiente implica que o edifício deve ser concebido e construído de modo a minimizar os efeitos negativos para o ambiente, através dos seguintes modos de expressão: reciclagem e reutilização dos materiais; impactes ambientais; conservação da energia e preservação ambiental (Rodrigues, 2013).

A presente análise crítica teve como base o quadro-síntese (Anexo A1) que pretende resumir sistematicamente os métodos utilizados nos 17 casos de estudo seleccionados (ACV e *non LCA-based*) aplicados no sector da construção de edifícios em coberturas verdes extensivas. O quadro-síntese foi organizado segundo as seguintes categorias, as quais serão analisadas no capítulo seguinte: **1) Âmbito dos indicadores:** desempenho ambiental, económico e social; **2) Objectivos:** descrição da exigência funcional decorrente das necessidades humanas; **3) Critérios:** modo de expressão, i.e., quantificação detalhada do objectivo; **4) Métodos:** modo de verificação (avaliação) indicando os métodos para apurar se os critérios são observados; **5) Impactes ambientais** analisados

2.6.2. Âmbito dos indicadores (dimensão horizontal)

- 1) Relativamente ao “âmbito dos indicadores” foi adotada uma abordagem económica apenas num único caso de estudo (Wong et al, 2003), tendo os restantes 16 casos seguido uma abordagem ambiental, incluindo 2 abordagens conjuntas, ambiental/económica (Blackhurst et al, 2010) e ambiental/económica/social (Carter & Keeler, 2008), seguindo respectivamente as metodologias EIO-LCA (*Economic-input output life-cycle assessment*) e BCA (*Life-cycle cost-benefit analysis*) para unidades funcionais de análise à escala urbana de bairro ou cidade (vários milhões de m²). De salientar que as características marcadamente ecológicas das coberturas verdes extensivas (também definidas como coberturas ecológicas (*ecoroofs*)) tornam necessária uma Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) comparativa dos vários benefícios ambientais decorrentes da instalação desses sistemas construtivos relativamente a sistemas convencionais (Capítulo 2.6.2.2).
- 2) Relativamente aos “objectivos” considerados, os casos de estudo pretendem minimizar os efeitos negativos para o ambiente (7), o consumo de energia térmica (8) e os custos globais (um, incorporando custos de energia em custos de ciclo de vida).
- 3) Relativamente aos “critérios” considerados, 7 casos de estudo utilizaram critérios de impactes ambientais, conservação da energia e preservação ambiental (incluindo limitação dos consumos energéticos de aquecimento e arrefecimento); 8 utilizaram critérios de limitação dos consumos energéticos de aquecimento e arrefecimento; um utilizou apenas impactes ambientais; um utilizou critérios de limitação dos consumos energéticos de aquecimento e arrefecimento em conjunto com a minimização de custo global actualizado.
- 4) Relativamente aos “métodos” utilizados, os diversos casos de estudo são distribuídos da seguinte forma:
 - ACV (*Life Cycle Assessment*): (5 casos de estudo: Baena, 2012; Bianchini et al, 2012; Kosareo et al, 2006, Ottelé et al, 2011; Saiz et al, 2006);
 - Simulação experimental: (3 casos de estudo);
 - Simulação experimental; modelo matemático de simulação térmica: (3 casos de estudo);
 - Modelo de simulação térmica desenvolvido por Sailor (2008), baseado no trabalho de Frankenstein & Koenig (2004) - opção *Ecoroof* do *software* de simulação energética de edifícios *Energy-Plus*;
 - Modelo baseado fisicamente no balanço energético de uma cobertura verde, desenvolvido e integrado no programa de simulação energética de edifícios *Energy-Plus*: (1 caso de estudo)
 - LCC; Modelo de simulação térmica: (1 caso de estudo);
 - EIO-LCA (*Economic-input output life-cycle assessment*): (1 caso de estudo);
 - BCA (*Life-cycle cost-benefit analysis*): (1 caso de estudo).

De notar que foram seleccionados 9 casos de estudo não baseados no conceito do ciclo de vida (*non LCA based*), cuja inclusão se justifica por terem como objeto de análise as coberturas verdes extensivas. A maioria deles tem como objectivo

“minimizar consumo de energia térmica”, tendo em conta o “conforto térmico” durante a fase de utilização do edifício, enquanto que a metodologia energética LCEA (*Life Cycle Energy Analysis*) faz parte integrante duma avaliação completa do ciclo de vida (ACV).

5) Relativamente aos “impactes ambientais analisados”, os 2 casos de estudo realizados em Espanha (Baena, 2012; Saiz et al, 2006) e descritos no Capítulo 2.4.3.1, têm em comum os seguintes 4 indicadores de impactes ambientais .GW, potencial de aquecimento global; A, acidificação; E, eutrofização; OD, criação fotoquímica de ozono (todos fazem parte da presente ACV).

Nos últimos anos, a atenção centrou-se em métodos de avaliação de impacte que contemplam a modelação de danos (Erlandsson et al, 2003; Goedkoop et al, 1998; Hertwich et al. 2001; Seppälä et al, 2001). A modelação de danos não só permite a “caracterização” (potenciais impactes das categorias estudadas, tais como as alterações climáticas), como também analisa os danos, nas condições estabelecidas (Itsubo et al. 2002). No seu trabalho, Baena (2012) quantifica os impactes ambientais por meio do indicador de impacte ecológico *Eco-Indicator 99* (EI99), um método orientado para danos para Avaliação de Impacte do Ciclo de Vida (Goedkoop et al. 2000).

2.6.3. Escolha das ferramentas

As ferramentas que melhor cobrem os objetivos da questão de sustentabilidade colocada são aquelas cujo desenvolvimento é baseado nas metodologias adotadas e descritas nos casos de estudo selecionados durante a revisão de literatura realizada, tendo em consideração os dois bem conhecidos sistemas de classificação de ferramentas de avaliação ambiental de edifícios (*ATHENA* e *IEA Annex 31*).

A aplicação da metodologia de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) a uma componente dum edifício (cobertura verde extensiva) poderá recorrer a uma ferramenta classificada de *nível 1* (ferramentas de comparação de produtos), segundo o sistema de classificação *ATHENA* ou a uma ferramenta interativa de “ACV Ambiental para Edifícios e Stocks de Edifícios” de *nível 1*, segundo o sistema de classificação *IEA Annex 31*.

Métricas alternativas a valores monetários (tais como valores *Eco-Indicator*) e análises energéticas têm sido utilizadas para comparar coberturas verdes com coberturas convencionais, num contexto de sustentabilidade. No caso de estudo desenvolvido por Baena (2012) os impactes ambientais são medidos por meio do indicador de impacte ecológico *Eco-Indicator 99* (EI99), incluído no “pacote” de ferramentas de ACV da *SimaPro* (*PRé Consultants, SimaPro. Amersfoort, The Netherlands*) (Tabela 10). As ferramentas interativas de simulação energética de edifícios (p.e., *Energy-Plus*) são classificadas como “Software de Modelação de Energia” segundo o sistema *IEA Annex 31*.

A metodologia de ACV tem sido amplamente utilizada para avaliar os impactes ambientais que ocorrem durante o ciclo de vida de um edifício e para apresentar resultados objetivos e transparentes (Crawford, 2008; Tukker, 2000; cit. Jang, 2015). Em geral, existem três tipos de metodologias de ACV: **i)** ACV baseada em processos; **ii)** *input-output* LCA (IO-LCA), **iii)** ACV híbrida (Treloar et al, 2000). O modelo EIO-LCA (*Economic-input/output life-cycle assessment*) (Blackhurst et al, 2010) foi desenvolvido pela *Carnegie Mellon University* (ferramenta *online*). Embora não tenha sido especificamente concebido para a indústria da construção civil, tem sido utilizado em avaliações do ciclo de vida de edifícios e processos de construção, através da aproximação dos impactes ambientais de vários *inputs* a partir das correspondentes médias de sector industrial (O'Brien et al, 2006; Ochoa Franco, 2004).

Os 82 casos de estudos selecionados na revisão de literatura realizada na presente dissertação posicionam-se no quadro bidimensional de Análise da Sustentabilidade do Ciclo de Vida (LCSA) de várias formas, conforme foi analisado anteriormente. A resposta do ciclo de vida para a questão de sustentabilidade colocada - *Que abordagem será mais adequada para as coberturas verdes de tipologia extensiva?* - reflecte o estado da arte e aponta, para a seguinte abordagem metodológica genérica:

- Objeto de análise (dimensão vertical): cobertura verde extensiva (convencional) – posiciona-se no 1º nível do quadro da LCSA, como om “sistema de produtos” (*product-oriented technosystem*);
- Âmbito dos indicadores (dimensão horizontal): Ambiental;
- Objectivos: minimizar os efeitos negativos para o ambiente.;
- Critérios: impactes ambientais, conservação da energia e preservação ambiental (Limitação dos consumos energéticos de aquecimento e arrefecimento);
- Métodos: Avaliação do Ciclo de Vida (*LCA: Life Cycle Assessment*).

- Impactes ambientais analisados: (Capítulo 3.4.2 - Seleção das categorias de impacte)
- Ferramentas selecionadas:
 - ferramenta classificada de *nível 1* (ferramentas de comparação de produtos) segundo o sistema de classificação *ATHENA*;
 - ferramenta interativa de “ACV Ambiental para Edifícios e Stocks de Edifícios” de *nível 1*, segundo o sistema de classificação *IEA Annex 31*;
 - aplicabilidade/facilidade requerida: *user-friendly* (qualquer arquitecto ou engenheiro civil com falta de conhecimento específico em sustentabilidade/energia e/ou tomada de decisão poderá utilizar sem problema (Ferreira et al, 2013)).

2.7. RESUMO (COBERTURAS VERDES DE TIPOLOGIA EXTENSIVA)

Este resumo aborda a componente dum edifício - o sistema de revestimento designado de “cobertura verde plana de tipologia extensiva” - e incide sobre os aspetos fundamentais a ter conta na elaboração do seu projeto.

2.7.1. Definição e tipologias

As coberturas ajardinadas com isolamento térmico, geralmente designadas de “coberturas verdes”, enquadram-se nas tipologias construtivas de coberturas em terraço, podendo definir-se como sistemas tecnológicos complexos, adotando vegetação como parte integrante do envelope do edifício onde estão integradas. Tal como as coberturas convencionais, as coberturas verdes podem subdividir-se em coberturas planas e coberturas inclinadas (acessíveis ou de acesso limitado). Podem ser também designadas de coberturas ajardinadas (*roof gardens*), coberturas vivas (*living roofs, UK*), coberturas vegetais (*vegetated roofs*) e coberturas ecológicas (*ecoroofs*). Coberturas ajardinadas são referidas principalmente como tipologias intensivas, enquanto que coberturas ecológicas como tipologias de carácter mais extensivo. Segundo a FLL (2008), as coberturas verdes dividem-se em três tipos - em função da utilização, dos fatores construtivos e do grau de manutenção exigido - desempenhando um papel fundamental na seleção do tipo de plantas e no resultado final pretendido (FLL, 2008): intensiva, intensiva simples e extensiva. Dunnett e Kingsbury (2008) acrescentam um conjunto de soluções consideradas híbridas: semi-extensiva, cobertura verde para biodiversidade e cobertura castanha (*brown roofs*) (Tabela 2.7).

Uma cobertura verde do tipo extensiva utiliza uma vegetação aparentemente natural com muito poucas exigências de manutenção e de propagação, apresentando um substrato de crescimento pouco espesso que limita a diversidade de plantas apropriadas para cultivo, utilizando-se normalmente plantas integradas no clima do local de implementação (FLL, 2008). No entanto, esta tipologia precisa de ter capacidade de resistência a condições climáticas extremas e uma fácil capacidade de regeneração, sendo utilizada vegetação do tipo musgos e suculentas - tais como as do género *Sedum* da família *Crassulácea* (amplamente utilizadas na Alemanha) - plantas herbáceas e gramíneas, que podem ser complementadas com bolbos e tubérculos. Estes sistemas são auto-sustentáveis, não sendo normalmente irrigados e exigindo uma manutenção mínima (Raposo, 2011). Relativamente às dimensões deste tipo de cobertura verde, a espessura do substrato de crescimento é mais fina (2 a 15 cm), reduzindo o acréscimo de carga permanente da estrutura de suporte (Dunnett e Kingsbury, 2008). A utilidade duma classificação tipológica é evidente, mas bastante restritiva, existindo a possibilidade de combinação das características das tipologias intensivas com as tipologias extensivas para obter uma única solução de cobertura verde (Dunnett e Kingsbury, 2008). Grant (2006, cit. Raposo, 2011) define coberturas verdes como edifícios protegidos com terra (*building-integrated habitat*) e viadutos selvagens (*wild overpass*). Estas tipologias são concebidas para harmonizar as estruturas construídas com o seu ambiente, permitindo de certa forma a continuidade da fauna e flora sobre elas.

Tabela 2.7 - Caracterização dos tipos de cobertura verde (adaptado de IGRA, 2013; Dunnett e Kingsbury, 2008; in Raposo, 2013).

	INTENSIVA	INTENSIVA SIMPLES	EXTENSIVA	HÍBRIDA
Manutenção	Elevada	Média - Baixa	Baixa (anual)	Baixa (anual)
Irrigação	Regular	Periódica	Não exigida - Baixa	Não exigida - Baixa
Variedade de Plantas	Relvado, Plantas Perenes, Arbustos e Árvores.	Herbáceas, Gramíneas, Plantas Perenes e Arbustos.	Musgos, Seduns, Herbáceas e Gramíneas.	Variedades endémicas de Musgos, Seduns, Herbáceas e Gramíneas.
Altura do sistema construtivo	150 - 400 mm (edifícios); > 400 mm (estruturas enterradas).	120 - 250 mm	60 - 150 mm < 60 mm (variedade de plantas reduzida)	Variável entre 60 - 200 mm
Peso (de saturação, incluindo a vegetação)	180 - 500 kg/m ² (em média); > 500 kg/m ² (depende do tipo e da profundidade do substrato).	120 - 200 kg/m ²	60 - 150 kg/m ² 40 - 60 kg/m ² (muito finos e leves)	Variável entre 60 - 200 kg/m ²
Custo	Elevado	Médio	Baixo	Médio - Baixo
Utilização	Actividades de bem-estar e lazer/convívio; Biodiversidade	Biodiversidade e amenidades	Protecção e funções ecológicas.	Protecção e funções ecológicas. Biodiversidade e amenidades
Desempenho energético	Elevado	Elevado - Médio	Médio - Baixo	Médio - Baixo

2.7.2. Custos e benefícios

Segundo Raposo (2013), um problema particular que muitas tecnologias recentes enfrentam reflete-se no desequilíbrio entre os custos iniciais e o *cash-flow* esperado dos seus benefícios. No caso dos sistemas construtivos de coberturas verdes, Peck (2003, cit. Dunnett e Kingsbury, 2008) conclui que o facto destes sistemas construtivos oferecerem tantos benefícios leva a que seja muitas vezes difícil avaliar de forma integrada o seu verdadeiro potencial. Através de uma análise de custo/benefício (Gedge & Frith, 2004), poder-se-á obter uma perspectiva alargada dos efeitos do “enverdecimento” do topo dos edifícios, transformando, em primeiro lugar, os benefícios obtidos em equivalentes monetários, por forma a facilitar a persuasão de promotores interessados em investir neste tipo de mercado e, em segundo lugar, identificando o papel desses mesmos benefícios à escala urbana. Para Dunnett e Kingsbury (2008), alguns dos diversos benefícios da utilização de sistemas de coberturas verdes só funcionarão se um número relativamente grande de coberturas verdes forem instaladas numa determinada área e os seus benefícios só serão visíveis à escala de bairro ou de cidade. Outros benefícios atuarão diretamente sobre o edifício em particular. Raposo (2013) também identificou um conjunto de benefícios/desvantagens de coberturas verdes, aqui adaptada apenas para coberturas verdes de tipologia extensiva. A partir da sua proposta realçam-se os benefícios/desvantagens que mais interessam na sua avaliação (Tabela 2.8):

Tabela 2.8 - Benefícios/ desvantagens na avaliação de coberturas verdes extensivas (adaptado de Raposo, 2013).

Benefícios / Desvantagens	Referências
Benefícios económicos	
Eficiência energética – redução do custo de aquecimento e arrefecimento dos edifícios.	(Ascione et al, 2013; Hui, 2009; Martens & Bass, 2006)
Aumento da vida útil da membrana de impermeabilização.	(Batista, 2004; Lopes, Jorge M. Grandão (1994)(2004))
Aumento da eficiência de painéis fotovoltaicos e solares térmicos.	(Hui & Chan, 2011)
Potencial para adaptação de coberturas existentes - potencial para reabilitação.	
Contributo para avaliação da sustentabilidade de ambientes construídos.	
Benefícios ambientais	
Regulação da temperatura urbana – redução do efeito “ilha de calor urbana” (ICU).	(Alcoforado et al, 2006; Baltazar, 2010; Farrall, 2011; Gonçalves & Graça, 2004; Lopes, 2004; Sailor & Dietsch, 2005)
Melhoria da qualidade do ar.	
Gestão das águas pluviais – retardamento e minimização da escorrência das águas pluviais.	
Qualidade e tratamento das águas pluviais.	
Aumento do isolamento acústico e diminuição da intensidade do ruído.	
Criação e preservação de habitats e incremento da biodiversidade ecológica – produção de efeitos positivos na preservação da biodiversidade local, principalmente para aves e invertebrados e no desenvolvimento de variedades de musgos.	
Reciclagem de materiais - incorporação de materiais reciclados na sua constituição, reduzindo a necessidade de eliminação de resíduos para aterros sanitários.	
Benefícios sociais	
Valor estético e aumento da qualidade de vida dos utentes.	
Desvantagens	
Manutenção - no caso das coberturas do tipo extensivo, as necessidades de manutenção são baixas comparativamente às outras tipologias, visto serem idealizadas para ser auto-sustentáveis (estrutura de suporte – cobertura extensiva = 0,60-1,50 KN/m ² ; cobertura intensiva = 2,00-5,00 KN/m ²).	(Flores Colen, 2011; Morgado, 2012)
Garantias.	
Comportamento ao fogo - uma vegetação com base em suculentas é considerada resistente ao fogo	
Orientação e apoio.	
Custos - coberturas extensivas são mais baratas, embora a instalação dos tapetes de vegetação pré-cultivados apresente valores elevados.	(Wong et al, 2003)

2.7.3. Definição de objetivos em fase de projeto

Na fase de projeto será benéfico adotar uma abordagem exigencial (Rodrigues, 2013), considerando o subsistema do edifício (cobertura verde) hierarquicamente dividido em vários componentes (estrutura de suporte da cobertura, revestimento da cobertura e sistema de drenagem de águas pluviais, sendo a segunda o objeto de análise) e elementos (7 camadas funcionais). De acordo com Grant (2006), a definição de objetivos passará por um processo de priorização dos objetivos a alcançar. Mas, pela sua especificidade construtiva, as coberturas verdes têm requisitos construtivos específicos, exigências funcionais/desempenho que também interessa analisar. Em termos gerais apresentam-se as principais questões a ser abordadas na fase inicial de projeto (Tolderlund, 2010; citado por Raposo, 2013) (Tabela 2.9).

Tabela 2.9 - Principais questões a ser abordadas na fase de projeto (adaptado de Raposo, 2013).

1. Principais objetivos do projeto	2. Orçamento	3. Acessibilidade	4. Equipa de projeto
Função principal da cobertura e relação com o edifício; capacidade de carga estrutural; uma série de fatores (Tolderlund, 2010): considerações de ordem ambiental e adaptação a uma cobertura existente, manutenção a longo prazo, maturidade do mercado. Métodos de análise (Tolderlund, 2010).	O desenvolvimento do orçamento é necessário devido a componente crítica de qualquer instalação de cobertura verde (Tolderlund, 2010). económica que poderão ser desenvolvidos nesta fase: Avaliação do Ciclo de Vida (LCA: Life Cycle Assessment) Avaliação de Custo do Ciclo de Vida (Life Cycle Cost – LCC) Indicador de desempenho Valor Actual Líquido (VAL)		

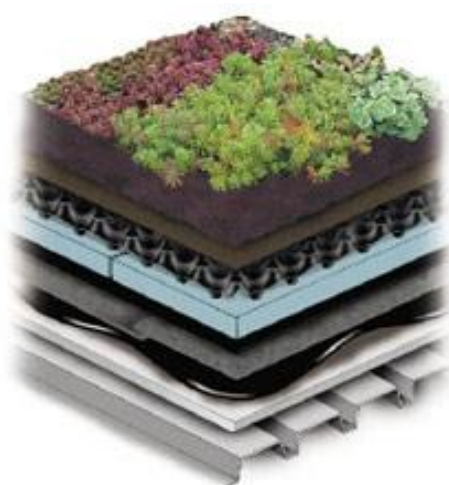
2.7.4. Solução construtiva (camadas funcionais)

Cada uma das camadas funcionais (elementos constituintes da componente de revestimento numa cobertura verde) poderá satisfazer várias funções específicas. No entanto, os objetivos principais devem ser definidos na fase inicial de

projeto, devendo a solução de projeto obedecer às seguintes condições: aplicação de uma variedade específica de plantas; espaço necessário para as raízes das plantas; nutrientes necessários às plantas; retenção de água; drenagem do excesso de água; estanquidade da cobertura. Os sistemas de coberturas verdes são compostos pelas seguintes 7 camadas funcionais (Tabela 2.10 e Figura 2.4):

Tabela 2.10 - Características das 7 camadas funcionais constituintes de uma cobertura verde.

Camadas funcionais	Função	Características
1 Vegetação	A escolha das espécies vegetais constituintes desta camada funcional é decisiva para o seu desempenho. Os critérios de seleção deverão ter em consideração as condições climáticas e os requisitos de manutenção das plantas (TGRTAG, 2010).	
2 Substrato de crescimento	O substrato de crescimento constitui a base de suporte das plantas, devendo permitir um bom desenvolvimento das raízes e possuir todas as propriedades físicas, químicas e biológicas básicas necessárias ao seu desempenho. Características necessárias, segundo a FLL, (2008):	<ul style="list-style-type: none"> • Estabilidade estrutural • Capacidade de absorção e armazenamento de água • Filtragem do excesso de água para a camada drenante • Capacidade de contenção de volume de ar adequado ao tipo de vegetação (mesmo quando saturado)
3 Camada filtrante	Tem a função de não permitir que as partículas finas do substrato sejam lixiviadas para a camada drenante, evitando assim que seja afetada a capacidade de drenagem e as saídas de escoamento (FLL, 2008).	
4 Camada drenante	Contém as cavidades suficientes para eliminação do excesso de água, enquanto a canaliza para as saídas de escoamento. Desde que utilizados os materiais adequados também pode funcionar como (FLL, 2008):	<ul style="list-style-type: none"> • Reservatório de retenção e acumulação de água • Espaço adicional para o desenvolvimento de raízes • Proteção das camadas subjacentes
5 Camada de proteção	Fornecer proteção adicional ao sistema de impermeabilização (membrana de impermeabilização / barreira de raízes) evitando danos mecânicos durante a fase de instalação. Dependendo da espessura e dos materiais utilizados, pode funcionar como (FLL, 2008; IGRA, 2013):	<ul style="list-style-type: none"> • Camada de retenção de água • Camada de retenção de nutrientes • Camada de separação
6 Barreira de raízes	Tem a função de proteção da membrana de impermeabilização e camadas subjacentes, evitando a sua danificação pela penetração de raízes. Em conformidade com os requisitos da FLL (2008), se a membrana de impermeabilização não for resistente à penetração de raízes, deve ser colocada uma barreira de raízes de modo a assegurar esta função.	
7 Membrana de impermeabilização	Constitui a componente deste sistema construtivo que é partilhada com os tradicionais sistemas construtivos de revestimento de coberturas, tendo as seguintes funções:	<ul style="list-style-type: none"> • Resistência à pressão hidrostática • Estanquidade do edifício.



Extensive Vegetation (Sedums, etc.)
 Growing Media
 Filter Fabric
 Moisture Retention / Drainage Panel
 Insulation
 Root Barrier
 Protection Course
 Waterproofing Membrane (hot rubberized asphalt depicted)
 Substrate (metal deck with gypsum board depicted)

Figura 2.4 - Cobertura verde extensiva sobre laje de betão armado (American Hydrotech, in <http://www.wbdg.org/resources/greenroofs.php>).

2.7.5. Exigências funcionais

“Exigências funcionais” definem-se como requisitos que determinadas necessidades dos utentes põem à utilização do todo ou parte do edifício em que exercem funções apropriadas e dividem-se em 3 grupos (segurança, habitabilidade e adequabilidade ao uso). Uma cobertura verde consiste na adição de camadas de substrato vegetal e plantas sobre um sistema de cobertura tradicional. É assim gerado um leque extenso e multidisciplinar de exigências funcionais apresentado na Tabela 2.11 :

Tabela 2.11 - Exigências funcionais de coberturas verdes.

Exigências funcionais		
Segurança	Habitabilidade:	Adequabilidade ao uso
<ul style="list-style-type: none"> • Segurança estrutural <ul style="list-style-type: none"> ○ Estabilidade ○ Cargas verticais ○ Inclinação da cobertura ○ Ação do vento • Segurança contra incêndio • Segurança na ocupação e no uso (acessibilidade) 	<ul style="list-style-type: none"> • Exigência de espaços para realização de atividades • Estanquidade <ul style="list-style-type: none"> ○ Seleção do sistema de impermeabilização ○ Barreira de raízes ○ Camada de proteção do sistema de impermeabilização ○ Pontos singulares • Conforto higrotérmico <ul style="list-style-type: none"> ○ Fatores a considerar na seleção dos materiais isolantes ○ 3 formas de aplicação da camada de isolamento térmico • Conforto acústico 	<ul style="list-style-type: none"> • Durabilidade • Manutenibilidade (Gestão e manutenção) <ul style="list-style-type: none"> ○ Projeto e instalação de coberturas verdes ○ Conservação e manutenção de coberturas verdes • Integração com o ambiente • Economia e custos globais • Gestão das águas pluviais <ul style="list-style-type: none"> ○ Sistema de drenagem pluvial ○ Retenção de águas pluviais ○ Capacidade de acumulação de água ○ Camada drenante ○ Camada filtrante • Desempenho da vegetação <ul style="list-style-type: none"> ○ Substrato de crescimento ○ Seleção das plantas ○ Plantação ○ Irrigação

2.7.6. Normalização e legislação de coberturas verdes

Em 1950, na Alemanha (Köhler, 2006), a tecnologia moderna de coberturas verdes começou a desenvolver-se, impulsionada pelo trabalho de investigação de Reinhard Bornkamm. Mais tarde, entre 1960 e 1970, uma população com consciência ambiental, o activismo ecológico, o interesse da comunidade científica e o apoio político, deram o impulso necessário para iniciar a instalação de coberturas verdes. Em 1975, nasceu a FLL (*Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau: Instituto de Investigação, Desenvolvimento e Construção da Paisagem*) com o objetivo de estudar a tecnologia de vegetação. Em 1978, surgiu um grupo de trabalho inspirado no trabalho de Bornkamm, dando início a um conjunto de investigações abrangendo duas tipologias de coberturas verdes (extensiva e intensiva) (Werthmann, 2007, cit. Raposo, 2011). Em 1982, a FLL emitiu a primeira diretiva para o planeamento, instalação e manutenção de coberturas verdes (a última data de 2008), descrevendo os princípios urbanos, ecológicos e económicos básicos, ainda hoje em utilização (Werthmann, 2007), permitindo assim o desenvolvimento em larga escala. A GRO (2011), reconhece que as Diretrizes FFL (*Landscape Research, Development and Construction Society Guidelines*) para o planeamento, execução e manutenção de sites de coberturas verdes, são uma base sólida a partir da qual se pode estabelecer uma recomendação mínima para especificação de coberturas verdes.

Poucos países têm regulamentos e diretrizes específicos de coberturas verdes. O documento anterior tem sido utilizado como base para os “manuais de boas práticas” de soluções construtivas de coberturas verdes em vários países (Suíça, Áustria, Reino Unido, Estados Unidos da América, Canadá e Japão) (GRO, 2011). As especificações apresentadas podem servir de referência a Portugal, visto que os materiais e a sua forma de aplicação nas soluções construtivas são semelhantes, independentemente das condições climáticas de cada localização, sendo necessária a sua adaptação, principalmente em aspetos diretamente relacionados com os seguintes fatores: clima e desempenho térmico, gestão de águas pluviais e desempenho da vegetação (Raposo, 2013). Em Espanha, as diretrizes da FLL (2008) serviram de base à recentes, abrangendo as tipologias intensiva, intensiva simples e extensiva, são as *NTJ 11C: 2012 Cubiertas verdes* (FJiP, 2013).

A IGRA (2013) considera que as diretrizes da FLL (2008) devem ser complementadas por normas e regulamentos nacionais que, em conjunto, deverão responder a questões técnicas relativas aos seguintes aspetos: construção do edifício (capacidade de carga da estrutura resistente, proteção contra a ação do vento, proteção contra incêndio, etc); impermeabilização e drenagem da cobertura; construção de jardins e espaços verdes (tipo de solo e plantas, mistura de sementes, conservação e manutenção, etc.); segurança e proteção contra quedas em coberturas de edifícios altos.

No contexto da UE, a 9 de Março de 2011, o Parlamento e o Conselho Europeu aprovaram o novo Regulamento de Produtos da Construção (305/2011) que em 1 de Julho de 2013 substituiu de forma integral a Directiva dos Produtos da Construção 89/106/CEE, já anteriormente alterada pela Directiva 1993/68/EEC. Em Junho de 2013 foi emitida, com o número 13/0668, a primeira Aprovação Técnica Europeia (*ETA – European Technical Approval*) para soluções construtivas de coberturas verdes (ZinCo®, 2013), com critérios de avaliação previamente definidos pela Organização Europeia de Aprovação Técnica (*EOTA - European Organisation for Technical Approval*), da qual é membro o LNEC e o DIBT (*Deutsches Institut für Bautechnik*).

3. METODOLOGIA

A Avaliação do Ciclo de Vida é conduzida de acordo com as normas ISO 14040 e ISO 14044, sendo desenvolvida em quatro etapas principais: **i)** Definição de objectivos e âmbito (*scope*); **ii)** Análise de inventário; **iii)** Avaliação de impacto; **iv)** Interpretação (Figura 3.1). As 3 primeiras etapas são descritas no presente capítulo e a quarta nos Capítulos 4 e 5. Tendo em consideração este quadro de ACV, a organização deste capítulo segue a estrutura metodológica exposta na documentação do *software GaBi* utilizado (PE Int'l, GaBi. 2014).

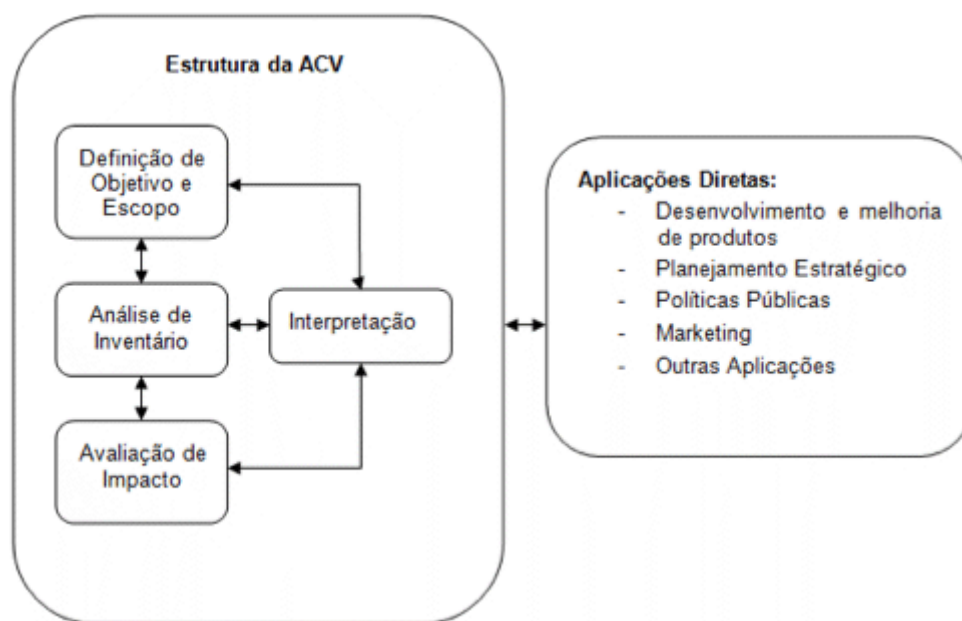


Figura 3.1 - Quadro metodológico da ACV (ISO 14040).

A metodologia utilizada na presente ACV é baseada nos dois documentos seguintes:

- Um guia de referência concebido para encorajar o debate científico - *Life cycle assessment; An operational guide to the ISO standards; Part 3 - Scientific background* (Guinée et al, 2001);
- A documentação do *software GaBi* (as recomendações para informação obrigatória e opcional são baseadas nas normas internacionais ISO 14040, ISO 14044, na ELCD (European Life Cycle Database), bem como na experiência da *PE International* e da *LBP- University of Stuttgart*) (PE Int'l, GaBi. 2014).

GaBi (Ganzheitliche Bilanzierung Integrated Assessment) é um pacote de *software*, cujo modelo é baseado em processos. Foi desenvolvido na Universidade de Stuttgart (Alemanha), permitindo avaliações do ciclo de vida em conformidade com a ISO 14040 (PE Int'l, GaBi. 2014). Utiliza uma base de dados de produtos integrada que foi desenvolvida ao longo de revisões da indústria e bibliografia técnica.

A ferramenta de ACV selecionada designa-se *GaBi 6.0 Education Version*, tendo como *developer* a *PE International*. Pode ser classificada de *nível 1* (ferramentas de comparação de produtos) de acordo com o sistema de classificação ATHENA ou classificada como uma ferramenta interativa de "ACV Ambiental para Edifícios e Stocks de Edifícios" de *nível 1*, segundo o sistema de classificação *IEA Annex 31* (Capítulo 2.4.4.).

A versão educacional fornecida tem algumas limitações no que diz respeito às bases de dados disponíveis (ficheiro da base de dados *GaBi* disponível: [C:\ProgramData\PEInternational\GaBi6\DatabasesEducation\Educationdatabase 2014.GabiDB]). No entanto, esta ferramenta é totalmente funcional, contendo um banco de dados abrangente dirigido especificamente a estudantes e professores universitários. Essa extensa base de dados contém conjuntos de dados (*datasets*) PE e USLCI (Essa extensa base de dados contém conjuntos de dados (*datasets*) PE e USLCI (U.S. Life Cycle Inventory Database)). As bases de dados fornecidas com o *software GaBi 6.0 Education Version* e que serviram de base à presente ACV são as seguintes :

- *PE: Education database 2014;*
- *ELCD/PlasticsEurope: Education database 2014;*

- *PlasticsEurope: Education database 2014*;
- *Inventory of Carbon & Energy (ICE) Version 2.0, University of Bath, UK* (base de dados utilizada, quando não foram encontrados dados adequados de processos/fluxos nas bases de dados *GaBi*) (ICE, 2011).

Além dos anteriores, outros documentos serviram de base ao presente estudo de ACV:

- Declaração Ambiental de Produto - Sistemas de Impermeabilização de Coberturas, com Membranas Betuminosas Totalmente Aderidas (Imperialum, 2013);
- *Product Category Rules according to ISO 14025:2006, Flexible sheets for waterproofing - bitumen , plastic or rubber sheets for roof waterproofing*, (PCR, 2014);
- *Product Category Rules according to ISO 14025, Product group classification: Multiple UN CPC codes construction products and construction services*, (PCR, 2015).

Estes documentos seguem o referencial normativo da ISO 15804 - *Sustainability of Construction Works - Environmental Product Declarations - Core Rules for the Product Category of Construction Products* (EN 15804, 2012).

A etapa de utilização/fim de vida (EOL: *end-of-life*) do ciclo de vida dos sistemas de produtos avaliados na presente dissertação baseou-se nos dados obtidos da ACV detalhada da *layer 6* (membrana de impermeabilização) das coberturas analisadas, a qual faz parte da Declaração Ambiental de Produto (EPD) acima referida (Imperialum, 2013). Esta EPD é baseada na metodologia estabelecida nas normas ISO 14040 e 14044, bem como nas “Regras de Categoria de Produto” (PCR, 2014) para sistemas de impermeabilização betuminosos, estabelecidas no âmbito das actividades da *BWA (Bitumen Waterproofing Association)*.

3.1. DEFINIÇÃO DO OBJETIVO E ÂMBITO

De acordo com a norma ISO 14040, a primeira etapa de uma ACV é a definição do objectivo e do âmbito. Através desta importante e obrigatória etapa fornece-se o ponto de partida fundamental para a realização do estudo, subdividindo-se em duas distintas: **i)** Definição do objetivo (Capítulo 3.1.1.); **ii)** Definição do âmbito (Capítulo 3.1.2.).

3.1.1. Definição do objetivo

Esta etapa subdivide-se em 4 módulos distintos: **i)** Aplicação prevista do estudo de ACV; **ii)** Propósito da ACV; **iii)** Público-alvo da ACV; **iv)** Utilização da análise comparativa. Segue a estrutura metodológica exposta na documentação do *software GaBi* utilizado (PE Int'l, GaBi. 2014).

3.1.1.1. Aplicação prevista do estudo de ACV

A aplicação prevista da presente ACV destina-se fundamentalmente na comparação de dois produtos - uma cobertura verde extensiva e uma cobertura convencional - e adicionalmente à melhoria de produtos/serviços (*design*); à identificação de "pontos quentes" no ciclo de vida dos produtos; à aplicação de indicadores de desempenho ambiental.

Considerando a necessidade dessa análise comparativa importa aqui definir os dois “sistema de produtos” (*product-oriented technosystems*) a avaliar, os quais desempenham a mesma de função (ou funções). Esses dois sistemas são designados de:

- **Cobertura verde extensiva** (Imperialum, 2015) (Figura 3.2 - designação comercial [*])
- **Cobertura convencional** (Imperialum, 2015) (Figura 3.3 - designação comercial [*])

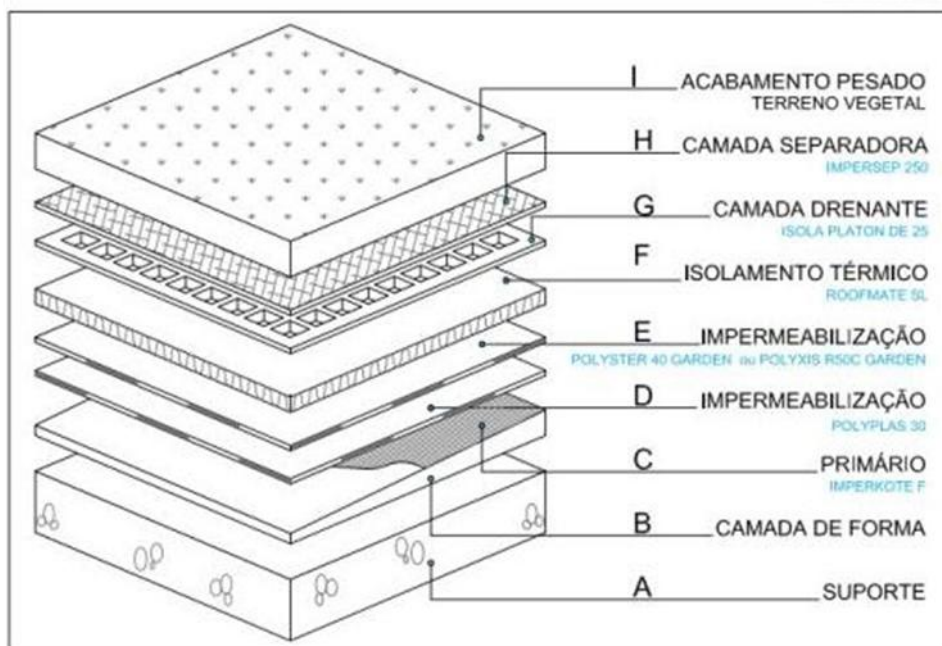


Figura 3.2 – Solução comercial de cobertura verde extensiva [3.7 Coberturas ajardinadas 3.7.1 Solução com isolamento térmico (sistema aderido)] (Imperialum, 2015).

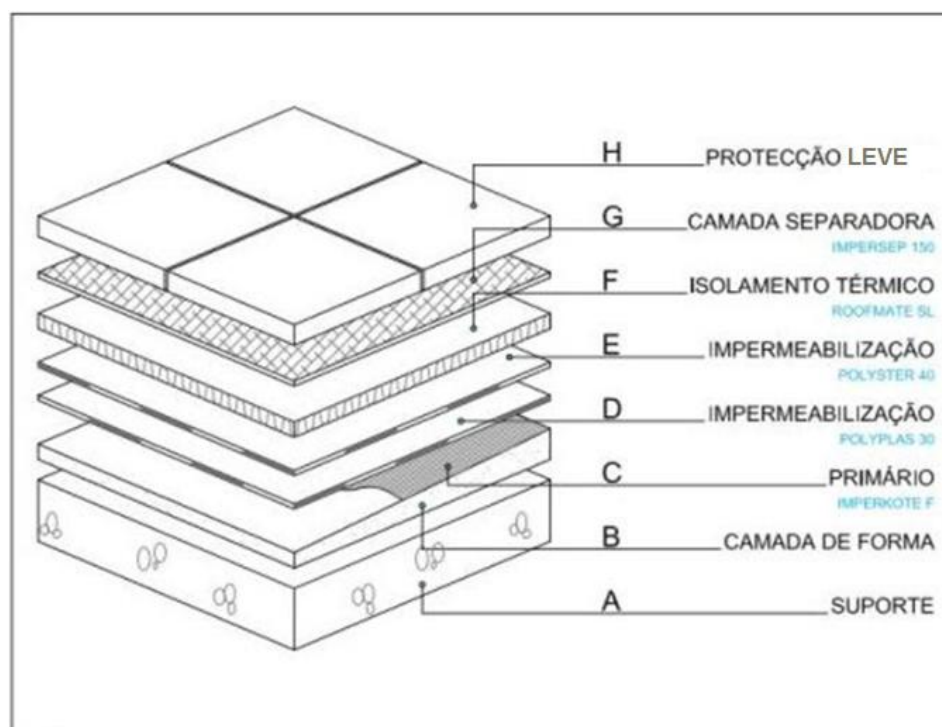


Figura 3.3 – Solução comercial de cobertura convencional [3.3 Coberturas de acessibilidade limitada 3.3.2. Solução com isolamento térmico (cobertura invertida) Imperialum] (Imperialum, 2015).

3.1.1.2. Propósito da ACV

O propósito de uma ACV pode ser bastante variável e irá ditar o âmbito do estudo. Se o estudo se destina a ser publicado, o seu âmbito deverá ser mais abrangente, pelo que implicará um maior esforço na recolha de dados e um processo de revisão formal. Se for utilizada internamente, a avaliação crítica não será necessária, sendo o âmbito ditado pelo objectivo da empresa e o seu acesso aos dados (PE Int'l, GaBi, 2014).

A presente ACV destina-se a ser publicada. No entanto, devido às inerentes limitações temporais, esta tem um nível de detalhe simplificado, como mais adiante será analisado.

3.1.1.3. Público-alvo da ACV

A audiência pode ser formada pelos seguintes agentes do setor da construção e urbanismo:

- Técnicos que intervêm no processo da construção e urbanismo (gabinetes de arquitetura e engenharia);
- Responsáveis e técnicos operacionais de empresas da indústria da construção e da urbanização (promotores, construtores, fabricantes de produtos e materiais de construção);
- Profissionais com intervenção na gestão de edifícios e áreas urbanas (instaladores e técnicos de manutenção de redes e serviços);
- Responsáveis e operacionais das administrações públicas (Câmaras Municipais e outras entidades locais, envolvidas na planificação e gestão urbana);
- Universidades e centros de investigação especializados em temas de urbanismo e sustentabilidade.
- Potenciais consumidores de produtos ecológicos (*ecoroofs*).

3.1.1.4. Utilização da análise comparativa

Apesar de não ser formulada como uma exigência nas normas ISO, estas fazem uma distinção entre estudos comparativos, particularmente as afirmações comparativas, e estudos não comparativos. Na norma ISO 14040 uma afirmação comparativa é definida como "uma declaração ambiental considerando a superioridade ou a equivalência de um produto em relação a um produto concorrente que executa a mesma função".

Sendo assim, considera-se que as características ecológicas da cobertura verde extensiva (*ecorooft*) tornam necessária uma análise comparativa dos benefícios ambientais decorrentes da instalação desse sistema construtivo, relativamente a um sistema convencionais de referência (cobertura plana convencional).

3.1.2. Definição do âmbito

Esta etapa subdivide-se em 6 módulos distintos: **i)** Função do produto; **ii)** Unidade funcional e fluxo de referência; **iii)** Fronteiras do sistema; **iv)** Nível de detalhe; **v)** Procedimentos de alocação e expansão do sistema; **vi)** Requisitos de qualidade de dados. Segue também a estrutura metodológica exposta na documentação do *software GaBi* utilizado (PE Int'l, GaBi, 2014). Este conjunto de módulos exigem definição antes da ACV ser realizada, mas antes, interessa esclarecer alguns aspectos importantes.

Durante a definição do âmbito (*scope*) o sistema de produtos (ou o processo) em estudo é caracterizado, todos os pressupostos são detalhados e a metodologia utilizada para configurar o sistema de produtos é definida. Nesta etapa, as principais características de um estudo de ACV são estabelecidas, abrangendo questões temporais, geográficas, tecnológicas, o modo de análise utilizado e o nível geral de sofisticação do estudo.

Relativamente ao nível de sofisticação (nível de detalhe ou de profundidade), pode-se distinguir entre uma abordagem mais detalhada e uma mais simplificada (*streamlined*). A ACV detalhada é adequada para aplicações importantes, tais como aprovações ou proibições governamentais. Uma abordagem mais simplificada é adequada para certas aplicações empresariais e para melhoria de produtos. A simplificação pode ser alcançada através dos seguintes fatores (Guinée et al, 2001): **i)** concentração nas diferenças entre as alternativas de produtos; **ii)** exclusão de certos elementos da ACV; **iii)** limitação do número de processos; **iv)** limitação do número de efeitos ambientais.

Note-se que a introdução de simplificações pode implicar diminuição de fiabilidade (*reliability*), particularmente se se decidir limitar o número de processos ou os efeitos ambientais examinados, e que essa fiabilidade reduzida deve estar em conformidade com a importância da aplicação da ACV (Tabela 3.1).

Tabela 3.1 – Nível de detalhe recomendado para 6 diferentes situações de decisão (Guinée et al, 2001).

	simplified	detailed	extended
Global exploration of options	X		
Company-internal innovation	X		
Sector-wide innovation	X	X	
Strategic planning	X	X	
Test/comparison		X	
Comparative assertion disclosed to the public		X	X

No capítulo 3.1.2.4. será definido o nível de detalhe da presente ACV.

3.1.2.1. Função do produto

Para descrever um produto, a sua função tem de ser definida, i.e., as suas exigências funcionais têm que ser definidas. No caso de produtos diferentes serem comparados, as diferentes funcionalidades de cada um deles devem ser documentadas. Por vezes, os produtos têm uma grande variedade de funções, o que torna bastante difícil a sua comparação em relação a toda a gama de funcionalidades.

Dum modo geral, pode-se afirmar que a exigência funcional avaliada nesta ACV, consiste na integração das componentes do edifício com o ambiente exterior. Isto significa que o edifício (e suas componentes) deverá ser concebido e construído de modo a minimizar os efeitos negativos para o ambiente (objetivo), através dos seguintes modos de expressão: reciclagem e reutilização dos materiais; impactes ambientais; conservação da energia e preservação ambiental (Rodrigues, 2013).

Os dois “sistema de produtos” da presente ACV desempenham a mesma de função (ou funções) e irão ser objeto duma avaliação comparativa. Uma cobertura verde extensiva consiste na adição de camadas de substrato vegetal e plantas sobre um sistema de cobertura plana convencional, sendo assim gerado um leque extenso e multidisciplinar de exigências funcionais já apresentado Capítulo 2.6.

Conforme descrito nesse capítulo, as coberturas verdes são compostas pelas por 7 camadas funcionais (*layers*). Cada uma dessa camadas (elementos constituintes da componente de revestimento da cobertura verde) satisfaz várias funções específicas. Esta tipologia difere da solução construtiva de referência (cobertura convencional) apenas na camada de proteção pesada, que é substituída pelas camadas de vegetação e substrato de crescimento, conforme se pode visualizar na Figura 3.4 e na Tabela 3.2.

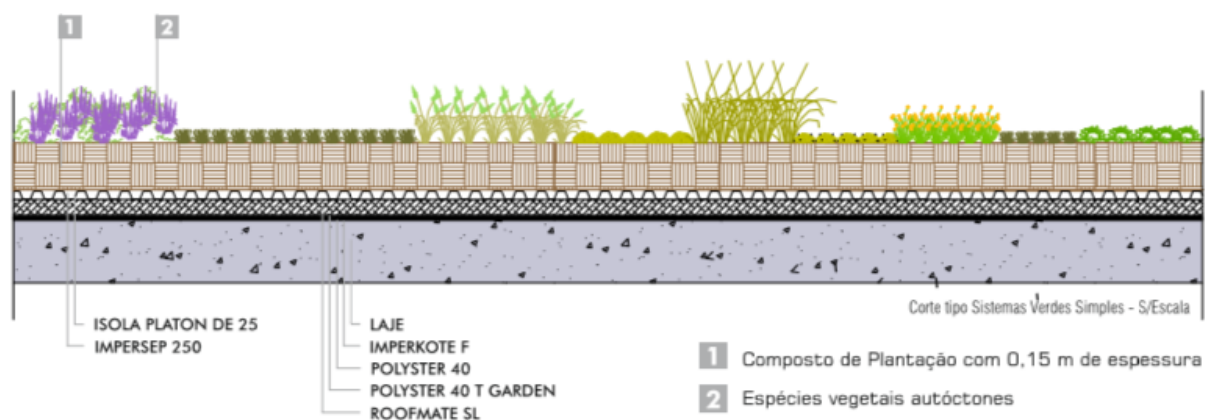


Figura 3.4 - Características do sistema construtivo comercial (camadas funcionais) (Decoverdi, 2015).

Tabela 3.2 - Características do sistema construtivo comercial (camadas funcionais).

Layers	Produto	Material	Descrição do Material	Peso [Kg]	%	Cond. Térmica λ (W/m2 C)	Esp (m)	Esp / λ	Comentários
1	DECOPLANT RUSTIC	Camada vegetal		34,00	10,70%				Plantas tapizantes muito resistentes (planta rasteira que pode ser utilizada para cobrir o solo; abafa/controla as ervas daninhas). Autóclones e Adaptadas. Plantas adaptadas a temperaturas extremas, seleccionadas em função da localização geográfica e climática. Este sistema procura ter uma maior preocupação estética/visual. Profundidade do substrato de crescimento (cm): Musgos – sedum < 4 a 8 ; Sedum – musgos – pequenas herbáceas 6 a 10; Sedum – musgos – pequenas gramíneas 10 a 15 Gramíneas e herbáceas 15 a 20
2	DECOPLANT RUSTIC	Substrato de crescimento	Composto de Plantação ou Turfa vegetal	225,00	70,83%	1,75	0,15	0,0857	Composto de Plantação constituído por: - Argila expandida / rocha vulcânica (1/3); - Terra vegetal enriquecida com nutrientes (2/3); Este composto rico em nutrientes deverá ter, em média, uma espessura de 15 cm.
3	IMPERSEP 200	Manta geotêxtil de fibras sintéticas	Manta geotêxtil de fibras sintéticas como camada separadora tipo IMPERSEP 200	0,20	0,06%	0,04	0,0015	0,0375	Tecido não tecido de fibras sintéticas com uma gramagem de 200 g/m2 (+10%; -15%). Tecido NÃO com peso Uma Tecido de 200 g / m2 fibras sintéticas (+ 10%, -15%). Um geotêxtil é uma tela permeável e flexível de fibras sintéticas, principalmente de polipropileno e de poliéster, que pode ser fabricado de forma não-tecida (non-woven) ou tecida (woven) dependendo da utilização ou função a desempenhar. <i>Thermally strengthened, UV-stabilized filter sheet made of 100 % polypropylene, highly resistant to mechanical stress.</i>
4	ISOLA PLATON DE 25	Poliétileno de alta densidade (PEAD)	Lâmina granular de polietileno de alta densidade tipo ISOLA PLATON DE 25	0,96	0,30%	0,5	0,001	0,0020	Placas de drenagem perfurada: Placa em PEH guarnecida, com canais em ambas as direcções entre grânulos. Os grânulos numa das faces da lâmina têm uma distância aproximada entre si de centros de 60 mm em ambas as direcções, proporcionando a circulação de ar a construção subjacente. Todos os canais estão dotados de seps de drenagem dispostas alternadamente entre as filas de grânulos, apenas numa direcção.
5	IFOAM / COBERTURAS	Poliestireno extrudido (XPS)	Placas de poliestireno extrudido, tipo IFOAM COBERTURAS/PAVIMENTOS	2,10	0,66%	0,034	0,06	1,7647	Placas em espuma rígida de poliestireno extrudido (XPS) na cor cinza grafite para isolamento térmico de edifícios. Composição: Betume de destilação (sem alcatrão), polímeros plasméricos, elastoméricos e outros, carbonato de cálcio, aditivos. As membranas podem conter poliéster e/ou fibra de vidro, como armaduras, bem como ardósia, cortiça, areia, filme de polietileno ou poliéster, alumínio e/ou película autadesiva recoberta com papel siliconizado, como acabamentos.
6a	POLYSTIR 40 GARDEN		Membrana de impermeabilização de betume polímero APP, tipo POLYSTIR 40 GARDEN	4,00	1,26%	0,2	0,0031	0,0155	As membranas POLYSTER 40 e POLYSTER R40 são obtidas por recobrimento das duas faces das respectivas armaduras – poliéster de 150 g/m2, no caso das membranas POLYSTER 40, e de fibra de vidro de 45 g/m2 e poliéster de 150 g/m2, no caso das membranas POLYSTER R40 – com uma mistura contendo cerca de 60% de betume, 20% de polímero plasmérico APP e 20% de cargas minerais de carbonato de cálcio. Estas membranas podem ser acabadas com filmes de polietileno ou com areia fina.
			Aditivo anti-raízes						Aditivo anti-raízes na massa betuminosa
			60% de betume						
			20% de polímero plasmérico APP						
			20% de cargas minerais de carbonato de cálcio						
			Poliéster de 150 g/m2						Armadura de poliéster protegida a polietileno em ambas as faces.
			Poliétileno						Armadura de poliéster protegida a polietileno em ambas as faces.
6b	POLYPLAS 30		Membrana de impermeabilização de betume polímero APP, tipo POLYPLAS 30	3,00	0,94%	0,2	0,0023	0,0115	mistura contendo cerca de 60% de betume, 20% de polímero plasmérico APP e 20% de cargas minerais de carbonato de cálcio.
			60% de betume						
			20% de polímero plasmérico APP						
			20% de cargas minerais de carbonato de cálcio						
			Poliéster de 150 g/m2						Armadura de poliéster protegida a polietileno em ambas as faces.
			Poliétileno						Armadura de poliéster protegida a polietileno em ambas as faces.
7	IMPERKOTE F	Emulsão betuminosa	Emulsão betuminosa como primário de impermeabilização, tipo IMPERKOTE F	0,40	0,13%	0,001		0,0000	Composição: Betume de destilação (sem alcatrão), emulsionante natural (bentonite e/ou outro), água. Nalguns casos (IMPERKOTE L) contém latex. Constituição: É uma emulsão betuminosa não iónica de aspecto pastoso, solúvel em água e misturável com areia, cimento, gralilha, fibras minerais, etc. É constituída por betumes e resinas, fílerizada e estabilizada com emulsionantes minerais coloidais que asseguram a sua estabilidade. Uma vez dada a rotura da emulsão, por evaporação da fase aquosa, consegue-se uma camada contínua que não flui a temperaturas elevadas. Utilizações: Como primário em impermeabilização diluído 2/3 de emulsão e 1/3 de água. Emulsões betuminosas para utilização como primário em sistemas de impermeabilização ou outras utilizações
8	Betão leve de argila expandida	Betão leve de argila expandida		48,00	15,11%	0,156	0,1	0,6410	

3.1.2.2. Unidade funcional e fluxo de referência

A unidade funcional descreve a função(s) primária satisfeita por um sistema (produto) e indica a quantidade desta função a ser considerado na ACV. É utilizada como base para seleccionar um ou mais sistemas (produtos) alternativos que possam fornecer essa função(s). A unidade funcional permite que diferentes sistemas sejam tratados como funcionalmente equivalentes e permite também que os fluxos de referência sejam determinados para cada uma deles. Ou seja, a unidade funcional é a definição quantificada da função de um produto; a fim de comparar dois produtos, as suas unidades funcionais devem ser equivalentes. (Guinée et al, 2001).

Ao adotar-se uma abordagem exigencial de sistemas na fase de projeto, considerou-se o subsistema do sistema “edifício” (cobertura verde extensiva plana de acesso limitado) hierarquicamente dividido em 3 componentes: **i)** estrutura de suporte da cobertura; **ii)** revestimento da cobertura (objeto de análise desta ACV, sendo constituído por vários elementos (camadas funcionais) (Kellenberger et al, 2009); **iii)** sistema de drenagem de águas pluviais. A mesma lógica se aplica à cobertura de referência (cobertura convencional plana de acesso limitado).

Tendo isso em consideração, a unidade funcional utilizada na presente ACV corresponde 1 m² da componente de revestimento duma cobertura verde extensiva, que irá ser comparada com 1 m² da componente de revestimento da cobertura convencional de referência. O tempo de serviço estimado é de 90 anos, sendo equivalente ao definido na “Declaração Ambiental de Produto - Sistemas de Impermeabilização de Coberturas com Membranas Betuminosas Totalmente Aderidas” (Imperialum, 2013).

A ferramenta *GaBi* é estruturada numa hierarquia de objetos, dos quais interessa destacar os seguintes: **i)** planos; **ii)** processos; **iii)** fluxos. *GaBi* calcula os potenciais impactes ambientais, bem como outras quantidades importantes de um sistema de produtos, com base num plano. Um plano representa o sistema com as suas fronteiras (limites). O sistema a ser estudado é composto por processos que representam os processos reais que estão ocorrendo. Os fluxos representam todos os fluxos de materiais e energia transferidos entre processos e de e para o sistema (*input/output flows*)

As Figuras, 3.5, 3.6 e 3.7 representam os planos *Gabi* da cobertura verde extensiva, da camada funcional 8 e da cobertura convencional (PE Int'l, GaBi, 2014).



Figura 3.5 - Plano de processos: cobertura verde extensiva (PE Int'l, GaBi, 2014).

6 Membrana de impermeabilização bicapa

Plano de processo GaBi: Mass [kg]
Os nomes dos processos básicos são mostrados.

mistura contendo cerca de 60% de betume, 20% de polímero plastómero APP e 20% de cargas minerais de carbonato de cálcio.

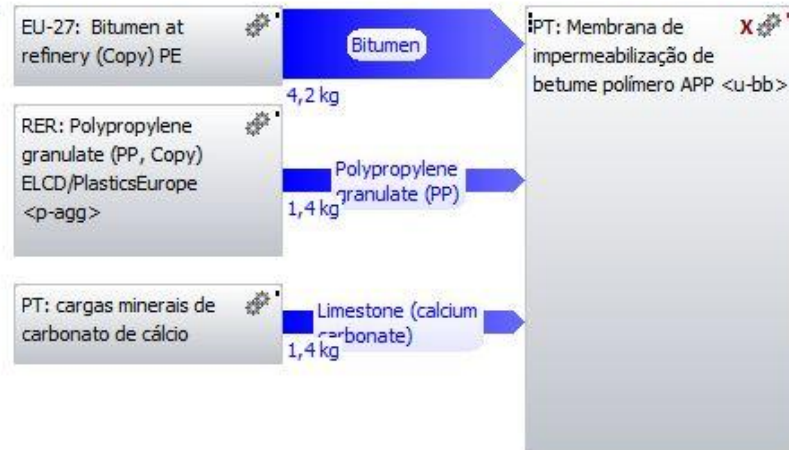


Figura 3.6 – Plano de processos: camada funcional da membrana de impermeabilização bicapa (layer 6) (PE Int'l, GaBi, 2014).

Cobertura convencional

Plano de processo GaBi: Mass [kg]
Os nomes dos processos básicos são mostrados.

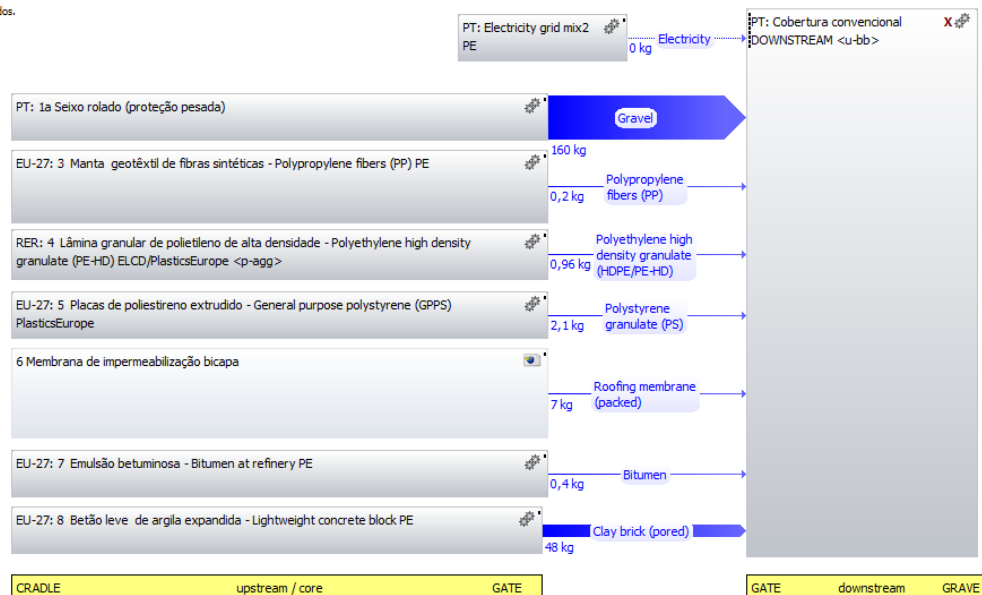


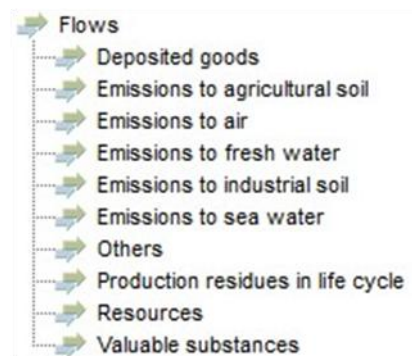
Figura 3.7 – Plano de processos: cobertura convencional (PE Int'l, GaBi, 2014).

Os fluxos provenientes do sistema natural que entram no sistema de produtos (p.e., carvão) ou que deixam o sistema (p.e., emissões de CO₂) são designados de fluxos elementares. Ao criar uma lista de todos esses fluxos de entrada/saída associados ao sistema, está-se a criar o Inventário do Ciclo de Vida (LCI: *Life Cycle Inventory*). A fim de calcular o potencial impacte ambiental de um sistema, a ferramenta *GaBi* precisa de compreender a sua natureza. É importante entender que estes contêm informações que indicam ao *software* até que ponto uma unidade de um fluxo contribui para diferentes

categorias de impacte: são os chamados de fatores de classificação e caracterização. Em *GaBi*, todos os fluxos são definidos como elementares ou não-elementares (PE Int'l, GaBi, 2014) (Tabela 3.3):

- Fluxos elementares: são fluxos que entram na tecnosfera diretamente da natureza (p.e., recursos) e os fluxos de saída da tecnosfera diretamente para a natureza (p.e., todos os fluxos das emissões para a atmosfera, água e solo);
- Fluxos não-elementares: são fluxos que se movem apenas dentro da tecnosfera, não entrando directamente a partir do mundo natural e não saindo do tecnosfera para o mundo natural;
- Fluxos rastreados (*tracked flows*): incluem substâncias valiosas e fluxos de energia que podem ser utilizados noutro processo. Um fluxo de saída rastreado pode ser conectado com um fluxo de entrada rastreado do processo seguinte na cadeia de processos. Também é possível uma conexão entre planos e processos pelos fluxos rastreados;
- Fluxos de resíduos: são fluxos de resíduos que requerem processamento adicional, dentro ou fora do sistema atual, mas que permanecem dentro da tecnosfera.

Tabela 3.3 – Árvore de fluxos - recursos (PE Int'l, GaBi, 2014).



Parte da definição de uma unidade funcional, é a definição de um fluxo de referência. Este consiste na medida dos componentes e materiais necessários para cumprir a função de produtos, tal como definido pela unidade funcional. Todos os dados recolhidos durante a fase de inventário (LCI) estão com ele relacionados, i.e., todos os dados utilizados na ACV devem ser calculados ou dimensionados de acordo com esse fluxo de referência.

Os processos (fluxos) de referência fixados nos dois planos concebidos com o *software GaBi*, são os seguintes : i) Cobertura verde extensiva DOWNSTREAM:PT; ii) Cobertura convencional DOWNSTREAM:PT.

3.1.2.3. Fronteiras do sistema

A norma europeia EN 15804 fornece as "Regras Categoria de Produto" para todos os produtos e serviços de construção. Oferece uma estrutura que garante que todas as "Declarações Ambientais de Produto" (EPD) de produtos de construção, serviços de construção e processos de construção são derivadas, verificadas e apresentadas de uma forma harmonizada (EN 15804, 2012). A norma divide o Ciclo de Vida de um edifício (Figura 3.8) em etapas do ciclo de vida e módulos. Dentro da nova base de dados para a construção *GaBi*, cada conjunto de dados é modelado, agrupado e marcado em conformidade com a sua metodologia e modularidade. Esses conjuntos de dados (*datasets*) podem ser utilizados para modelar o ciclo de vida de um edifício.

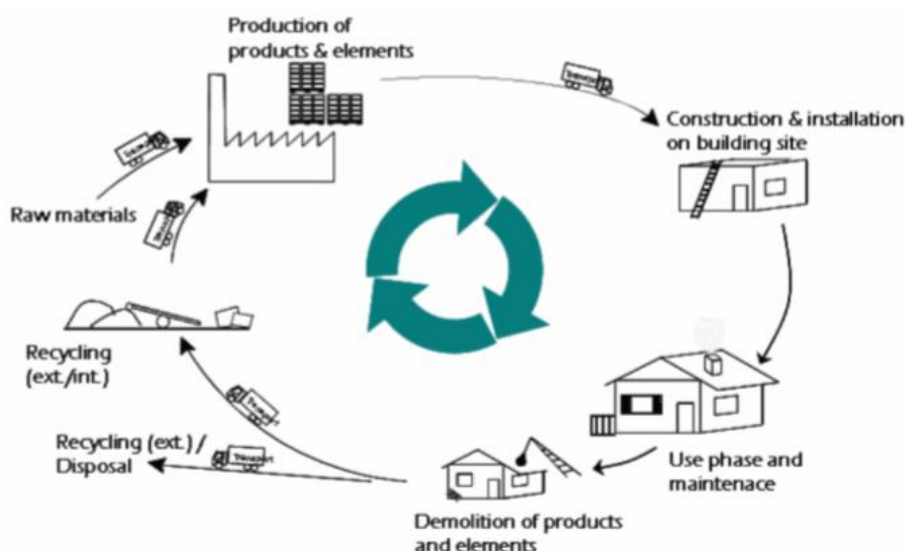


Figura 3.8 - Esquema do Ciclo de Vida de um edifício (PE Int'l, GaBi, 2014).

A metodologia da EN 15804 divide o ciclo de vida de um edifício nas seguintes etapas: i) Produção; ii) Instalação; iii) Utilização, iv) Fim de vida; v) Benefícios e desvantagens derivados do processo de ciclo de vida. Cada uma destas etapas são ainda divididas em etapas mais detalhadas, chamados módulos. Os módulos são continuamente numerados dentro das fases do ciclo de vida, utilizando uma letra maiúscula e um número. O sistema de nomenclatura para os módulos individuais do ciclo de vida é ilustrado na Tabela 3.4.

A presente ACV adota a metodologia e modularidade da EN 15804, tendo em conta aspectos relevantes que serão analisado nas duas alíneas seguintes deste capítulo.

Tabela 3.4 – Módulos das etapas do ciclo de vida de acordo com a EN 15804.

ETAPA DE PRODUÇÃO			ETAPA DE CONSTRUÇÃO		ETAPA DE UTILIZAÇÃO					ETAPA DE FIM DE VIDA				ETAPA DE RECUPERAÇÃO DE RECURSOS
A1	A2	A3	A4	A5	B1	B2	B3	B4	B5	C1	C2	C3	C4	D
Extracção e processamento de matérias-primas, processos de reciclagem para input de material reciclado.	Transporte para o fabricante.	Produção.	Transporte para o local da obra.	Processo de instalação.	Utilização do produto instalado.	Manutenção.	Reparação.	Substituição.	Reabilitação.	Desconstrução.	Transporte dos resíduos do produto para o operador.	Processamento dos resíduos; reutilização ou reciclagem, recuperação e/ou deposição.	Deposição.	Potenciais de reutilização, recuperação ou reciclagem e/ou recuperação.

i. Classificação de processos de fluxos e limites do sistema.

Um plano criado com o software GaBi representa o sistema com as suas fronteiras, consistindo num fluxograma de processos (PFD: *Process Flow Diagram*). A ferramenta GaBi contém 5 tipos de processos, em conformidade com o sistema ILCD (EC, ILCD Handbook, 2010), sendo categorizados de forma a compreender melhor a sua função dentro de um sistema de produtos:

- *u-so*: processo unitário de única operação, é muitas vezes referido como uma unidade de processo unitário ou processo *gate-to-gate*. Este tipo de processo contém apenas os dados para uma etapa de processo específico e sem dados de LCI;
- *u-bb*: “caixa negra” (*black box*) de processo unitário refere-se a um processo multifuncional ou cadeia de processos a nível de produção. Este tipo de processo pode representar um grupo de processos, em vez de uma única etapa do processo;

- *agg*: em contraste, consiste num resultado LCI que contém os dados de todo o ciclo de vida ou do ciclo de vida completo dum sistema de produtos. Este tipo de conjunto de dados é frequentemente referido como um processo *cradle-to-gate* ou processo de sistema;
- *p-agg*: sistema parcialmente terminado que contém todos os dados de LCI para o processo, exceto para os fluxos de um ou mais produtos que requerem modelação adicional. Este tipo de processo é por vezes referido como um processo parcialmente ligado.
- *aps*: designado de sistema de produto evitado. Pode ser um tipo de processo confuso, porque todos os fluxos de entrada e de saída são ajustados para valores negativos ou todas as entradas são convertidas para saídas ou vice-versa. Este tipo de conjunto de dados é tipicamente utilizado durante a modelação de alocação e mostra a forma como a utilização de certos materiais e energia são evitados pelo sistema de produtos em estudo.

Sempre que um sistema é estudado, é necessário definir os seus limites (fronteiras) para o separar do “resto do universo”. Na análise de inventário dum ACV, três tipos de limites podem ser distinguidos (Heijungs et al, 1992): **i)** a fronteira entre o sistema de produtos e o sistema ambiental; **ii)** a fronteira entre os processos que são relevantes e irrelevantes para o sistema de produtos (*cut-off*); **iii)** a fronteira entre o sistema de produtos em questão e outros sistemas de produtos (alocação).

Existem quatro opções principais para definir os limites do sistema. A norma ISO 14044 detalha a seleção de uma fronteira do sistema para estudos de ACV (Figura 3.9) (PE Int'l, Gabi, 2014):

- *Cradle to Grave*: inclui a cadeia de produção de energia e materiais e todos os processos de extração de matérias-primas através das fases de produção, transporte e utilização, até ao tratamento de fim de vida do produto;
- *Cradle to Gate*: inclui todos os processos, desde a extração de matérias-primas através da fase de produção (*gate of the factory*); utilizada para determinar o impacte ambiental da produção de um produto;
- *Gate to Grave*: inclui os processos decorrentes das fases de utilização e fim de vida (pós-produção); utilizada para determinar os impactes ambientais de um produto, uma vez saído da fábrica;
- *Gate to Gate*: inclui os processos apenas da fase de produção; utilizado para determinar os impactes ambientais de uma única etapa de produção ou processo.

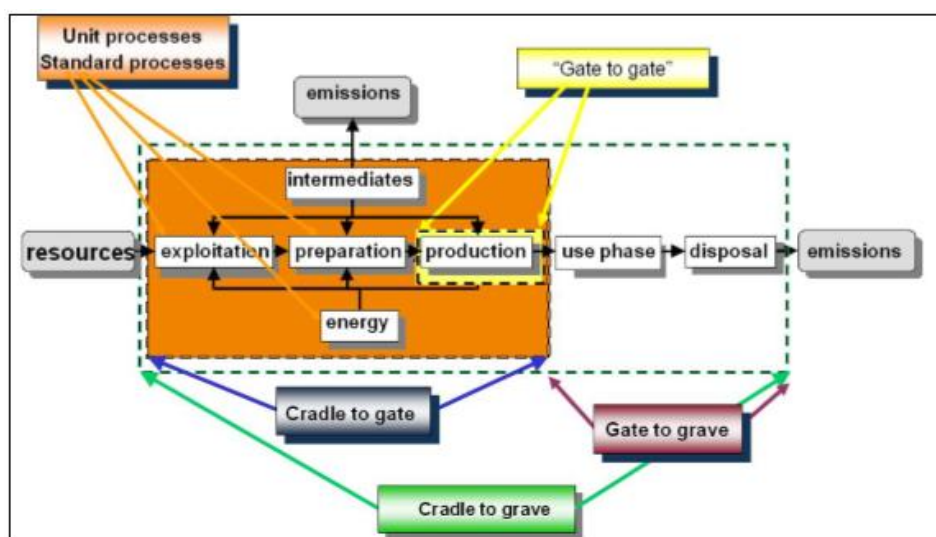


Figura 3.9 – Fronteiras do sistema (PE Int'l, Gabi, 2014).

ii. Declaração Ambiental de Produto (EPD) da Imperialum (2013)

Segundo a “Declaração Ambiental de Produto - Sistemas de Impermeabilização de Coberturas, com Membranas Betuminosas Totalmente Aderidas” da Imperialum (2013), as etapas do ciclo de vida desses sistemas aplicados sobre coberturas planas podem representar-se simplificadamente tal como se apresenta de seguida, sendo devidamente relacionadas com os requisitos da norma EN 15804 (Tabela 3.5):

- Processos a montante (M) (UPSTREAM): incluem todos os impactes devidos á produção das matérias-primas tais como o betume e os polímeros, bem como os materiais reciclados, e ainda ao respectivo transporte até à unidade produtiva;
- Processos principais (P) (CORE): incluem todos os aspectos relacionados com a produção das membranas betuminosas tais como, consumos de energia, emissões para a atmosfera e para a água e os impactes relacionados com os resíduos produzidos e respectivo destino final;
- Processos a jusante (J) (DOWNSTREAM): referem-se ao transporte das membranas betuminosas do local de origem até à cobertura a impermeabilizar, respectiva instalação e fases de reparação posteriores até ao seu encaminhamento e destino final, em fim de vida útil.

Tabela 3.5 - Etapas do ciclo de vida de sistemas de impermeabilização com membranas betuminosas aplicados sobre coberturas planas - adotadas na ACV desta dissertação (Imperialum, 2013).

Processo	Descrição	EN 15804
Processos a montante	<i>Obtenção e processamento das matérias-primas, processos de reciclagem, quando se incorporam materiais deste tipo</i>	A1
	<i>Transporte para o fabricante</i>	A2
Processos principais	<i>Produção</i>	A3
Processos a jusante	<i>Transporte para o local da obra</i>	A4
	<i>Aplicação do material em obra</i>	A5
	<i>Reabilitação (aplicação de material novo sobre o anterior)</i>	B5
	<i>Transporte dos resíduos do produto para o operador</i>	C2
	<i>Processamento do resíduo: reutilização, recuperação ou reciclagem, recuperação e/ou deposição</i>	C3
	<i>Deposição do resíduo</i>	C4
	<i>Potenciais de reutilização, recuperação ou reciclagem e/ou recuperação</i>	D

As fronteiras do sistema da ACV desenvolvida nesta dissertação são equivalentes às definidas na Tabela 3.5 anterior. Trata-se, portanto, de uma Avaliação do Ciclo de Vida *cradle to gate*. O presente estudo foi baseado nos dados obtidos da ACV detalhada que faz parte da Declaração Ambiental de Produto da Imperialum, mas apenas relativamente à etapa do ciclo de vida *gate to grave*, a qual inclui os processos a jusante (DOWNSTREAM) - transporte dos produtos do local de origem até à cobertura a instalar, respectiva instalação e fases de reparação posteriores até ao seu encaminhamento e destino final, em fim de vida útil.

De acordo com a declaração, a camada funcional das coberturas - 6 Membrana de impermeabilização bicapa (Membrana de impermeabilização de betume polímero APP) - é definida como uma camada flexível de betume produzida em fábrica, incorporando interior ou exteriormente uma ou mais armaduras, comercializada na forma de rolos prontos a usar, podendo representar-se esquematicamente na figura seguinte (Figura 3.10):

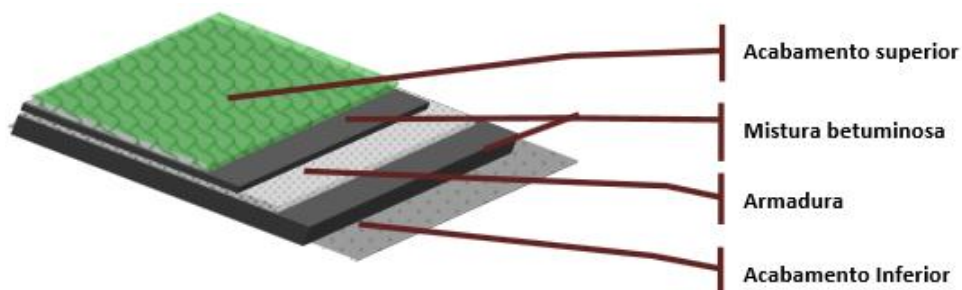


Figura 3.10 - Membrana de impermeabilização bicapa (Imperialum, 2013).

As membranas betuminosas podem ser integradas em sistemas monocamada ou multicamada (geralmente bicamada), para a impermeabilização de coberturas. Sistemas monocamada são constituídos por uma membrana única soldada nas juntas e aderida ao suporte por chama de maçarico. Sistemas bicamada: são compostos por duas membranas, sendo a membrana inferior soldada nas juntas e/ou aderida ao suporte. A membrana superior deverá ser completamente aderida, pela chama de maçarico, à membrana inferior. O sistema bicamada é o utilizado nas coberturas avaliadas na ACV desenvolvida nesta dissertação.

Em ambos os sistemas, monocamada ou bicamada, a aplicação das membranas é executada por recurso a aquecimento por meio da chama de maçarico apropriado, até à sua fluidificação superficial e à medida que essas membranas vão sendo desenroladas sobre um suporte. A aderência total ao suporte é obtida por pressão exercida sobre a face superior das membranas. A completa aderência das membranas entre si é obtida através de processo análogo. As membranas betuminosas que constituem os sistemas de impermeabilização alvo da presente declaração, possuem a seguinte composição aproximada (Tabela 3.6) (Imperialum, 2013). Estes dados foram considerados na modelação do plano de processos GaBi “membrana de impermeabilização bicapa” (Figura 3.6).

Tabela 3.6 - Composição aproximada: das membranas betuminosas (Declaração Ambiental de Produto da Imperialum, 2013).

	<i>Teor aproximado (%)</i>
<i>Betume</i>	<i>50 a 55</i>
<i>Carga mineral</i>	<i>20 a 30</i>
<i>Polímeros</i>	<i>5 a 10</i>
<i>Armaduras</i>	<i>3 a 4</i>
<i>Acabamentos</i>	<i>3 a 10</i>
<i>Outros (aditivos, embalagens, etc)</i>	<i>5 a 15</i>

3.1.2.4. Nível de detalhe

Tendo em consideração todos os pressupostos anteriores, neste capítulo são definidas e descritas as simplificações assumidas no modelo concebido durante o Inventário do Ciclo de Vida (LCI: *Life Cycle Inventory*) (Tabela 3.7):

- A presente ACV adota a metodologia e modularidade da EN15804, tendo em conta os seguintes aspectos (Tabela 3.4.):
 - não inclui os módulos B2, B3, B4 e C1;
 - inclui o módulo B1 da fase de utilização (utilização do produto instalado);
 - agrupa UPSTREAM + CORE numa única etapa *cradle to gate* (*product stage*) - desde a extração à produção.
- Os respectivos processos de referência fixados nos dois planos *GaBi* (cobertura verde extensiva DOWNSTREAM; cobertura convencional DOWNSTREAM) enquadram-se na tipologia *u-bb* (*gate to grave*) e incluem como *inputs*, além da camada funcional 6 (membrana de impermeabilização bicapa), todas as outras camadas dos sistemas construtivos analisados.
- Na fase *gate to grave* (DOWNSTREAM) assumiu-se uma distribuição de *inputs/outputs* proporcional ao peso de cada camada funcional, tendo como base os dados fornecidos pela EPD da camada funcional 6 (membrana de impermeabilização bicapa) (Tabela 9).
- Na fase *cradle to gate* (UPSTREAM + CORE), as restantes 7 camadas funcionais foram modeladas principalmente com base nos *process data sets* da *GabiDatabase Educational*.
- Adicionalmente e na fase *gate to grave* (DOWNSTREAM), os consumos energéticos (aquecimento/arrefecimento) da fase de utilização das coberturas integradas no edifício localizado em Lisboa, foram calculados simplificada e segundo a regulamentação térmica nacional (RCCTE, 2006; REH, 2013), considerando as condutibilidades térmicas dos materiais constituintes da cobertura, tendo posteriormente sido introduzidos no modelo criado. No Capítulo 3.3.3 será descrita a forma como foi realizada a Análise Térmica das coberturas planas - verde extensiva vs convencional.
- Durante a fase de concepção do modelo verificou-se uma lacuna na base de dados fornecida pela ferramenta educacional *GaBi*, relativamente a processos similares às camadas funcionais 5 e 8. Por aproximação, adotaram-se os seguintes processos *GaBi*: i) 5 Placas de poliestireno extrudido - *General purpose polystyrene (GPPS) PlasticsEurope :EU-27*; ii) 8 Betão leve de argila expandida - *Lightweight concrete block PE: EU-27*. Sendo assim, deverá considerar-se a possibilidade de algum aumento no nível de incerteza, bem como alguma diminuição na robustez dos resultados do modelo criado.

A elaboração da Tabela 3.7 seguinte (Nível de detalhe de todos os processos ACV criados com a ferramenta *GaBi*) leva a concluir que a presente ACV se trata duma ACV simplificada, mas com alguns processos detalhados.

Tabela 3.7 - Nível de detalhe de todos os processos ACV criados com a ferramenta GaBi.

Processos/Planos	Nível de detalhe	País	Fonte	Tipo de processo
1 Camada vegetal: PT	Simplificado	PT	Geller, K. L., Rowe, D. B., Robertson, G. P., Cregg, B. M., & Andresen, J. A. (2009). Carbon sequestration potential of extensive green roofs. Environmental science & technology, 43(19), 7564-7570.	agg - Resultado ICV CRADLE TO GATE
1a Seixo rolado (proteção leve)	Simplificado	PT	ICE, PE: Education database 2014 [C:\ProgramData\PE International\GaBi 6\Databases Education\Education database 2014.GabiDB]	agg - Resultado ICV CRADLE TO GATE
2 Substrato de crescimento: PT	Simplificado	PT	ICE, PE	agg - Resultado ICV CRADLE TO GATE
3 Manta geotêxtil de fibras sintéticas - Polypropylene fibers (PP) PE :EU-27	Detalhado	EU-27	PE	agg - Resultado ICV CRADLE TO GATE
4 Lâmina granular de polietileno de alta densidade - Polyethylene high density granulate (PE-HD) ELCD/PlasticsEurope <p-agg>:RER	Simplificado	RER	ELCD/PlasticsEurope: Education database 2014 [C:\ProgramData\PE International\GaBi 6\Databases Education\Education database 2014.GabiDB]	p-agg - Sistema parcialm. terminado
5 Placas de poliestireno extrudido - General purpose polystyrene (GPPS) PlasticsEurope :EU-27	Simplificado	EU-27	PlasticsEurope: Education database 2014 [C:\ProgramData\PE International\GaBi 6\Databases Education\Education database 2014.GabiDB]	agg - Resultado ICV CRADLE TO GATE
6 Membrana de impermeabilização bicapa (Membrana de impermeabilização de betume polímero APP)	Simplificado		Declaração Ambiental de Produto- Sistemas de Impermeabilização de Coberturas, com Membranas Betuminosas Totalmente Aderidas, sistema bicamada (Imperialum).	agg - Resultado ICV CRADLE TO GATE
Bitumen at refinery1: [6 Membrana de impermeabilização]	Detalhado	EU-27	PE	agg - Resultado ICV
Polypropylene granulate (PP)1: [6 Membrana de impermeabilização]	Simplificado	RER	ELCD/PlasticsEurope: Education database 2014 [C:\ProgramData\PE International\GaBi 6\Databases Education\Education database 2014.GabiDB]	agg - Resultado ICV
Cargas minerais de carbonato de cálcio: [6 Membrana de impermeabilização]	Simplificado	PT	ICE, PE	agg - Resultado ICV
7 Emulsão betuminosa - Bitumen at refinery PE :EU-27	Detalhado	EU-27	PE	agg - Resultado ICV CRADLE TO GATE
8 Betão leve de argila expandida - Lightweight concrete block PE: EU-27	Simplificado	EU-27	PE	agg - Resultado ICV CRADLE TO GATE
Cobertura verde extensiva DOWNSTREAM :PT	Simplificado REFERENCE PROCESS		Declaração Ambiental de Produto - Sistemas de Impermeabilização de Coberturas, com Membranas Betuminosas Totalmente Aderidas, sistema bicamada (Imperialum).	u-bb - Proc. unitário, "black box" GATE TO GRAVE
Cobertura convencional DOWNSTREAM:PT	Simplificado REFERENCE PROCESS		Declaração Ambiental de Produto - Sistemas de Impermeabilização de Coberturas, com Membranas Betuminosas Totalmente Aderidas, sistema bicamada (Imperialum).	u-bb - Proc. unitário, "black box" GATE TO GRAVE
Electricity grid mix1 PE: PT / Electricity grid mix2 PE: PT	Detalhado	PT	PE	agg - Resultado ICV

3.1.2.5. Procedimentos de alocação e expansão do sistema

Alocação define-se como o particionamento e atribuição dos *inputs/outputs* dum processo a produtos e subprodutos relevantes. A alocação a diferentes produtos é realizada de acordo com as regras definidas seguidamente, segundo PE Int'l, GaBi (2014):

- Alocação por massa: os *inputs/outputs* de um processo são atribuídos a todos os seus produtos proporcionalmente à sua massa;
- Alocação por *Heating Value*: os *inputs/outputs* de um processo são atribuídos a todos os seus produtos de acordo com seu *Heating Value*. Este método é usado frequentemente para processos de produção de combustíveis.
- Alocação por valor de mercado: Os *inputs/outputs* de um processo são atribuídos a todos os seus produtos de acordo com seu valor de mercado.
- Alocação por outras regras.

Uma vez que a escolha do método de alocação pode ter um impacto significativo sobre os resultados da ACV, a ISO sugere que a alocação deve ser evitada sempre que possível. A ISO também sugere a alocação de acordo com relações físicas como massa do produto ou *Heating Value*, em vez de relações não-físicas entre os produtos (p.e., o preço de mercado). Há duas formas de evitar a alocação: substituição e expansão do sistema.

3.1.2.6. Requisitos de qualidade de dados

Os requisitos de qualidade de dados (quality of a dataset) são determinados no início da ACV. A qualidade dos dados consiste num balanço entre viabilidade e integralidade (*completeness*) e apenas pode ser avaliada se as características dos dados forem suficientemente documentadas. A qualidade dos dados, portanto, corresponde à qualidade documentação, tendo sido consideradas as seguintes questões (PE Int'l, GaBi, 2014):

- Aquisição de dados: os dados são medidos, calculado ou estimados? Que percentagem dos dados necessários são dados primários ou são obtidos a partir da literatura e bases de dados (dados secundários)?
- Referência temporal: Quando foram obtidos? Existiram grandes alterações desde a recolha de dados que podem afetar os resultados?
- Referência geográfica: Para que país ou região são relevantes?
- Tecnologia (melhores tecnologias disponíveis): Os dados secundários de literatura ou as bases de dados são representativos do estado da arte?
- Precisão: Os dados são uma representação precisa do sistema?
- Integralidade: Há dados em falta? Como são preenchidas as lacunas de dados?
- Representatividade, consistência, reprodutibilidade: São representativos, consistentes e podem ser reproduzidos?

No Capítulo 4.2.1 é descrita a abordagem da qualidade de dados utilizada na ACV desenvolvida nesta dissertação, segundo 6 Indicadores de Qualidade de Dados (DQIs: *Data Quality Indicators*), cada qual com os seus critérios de avaliação (PE Int'l, GaBi, 2014).

3.2. ANÁLISE DO INVENTÁRIO DE CICLO DE VIDA (LCI)

A análise do Inventário de Ciclo de Vida (LCI: *Life cycle inventory*) é a etapa duma ACV que envolve a compilação e quantificação dos *inputs/outputs* de um determinado sistema de produtos durante todo seu ciclo de vida ou de processos individuais (PE Int'l, GaBi, 2014).

Na fase prévia de definição do objetivo e âmbito, as fundações do estudo foram estabelecidas, como foi discutido no Capítulo 3.1. De acordo com a norma ISO 14041, esta fase concentra-se na recolha dos dados necessários para cumprir os objetivos e é, essencialmente, um inventário de dados *input/output*. Foi necessário preparar esse inventário, primeiro qualitativo depois quantitativo, de todos os processos envolvidos no ciclo de vida do sistema de produtos em estudo, detalhando todas as interações relevantes com o meio ambiente. A análise de inventário é geralmente a fase de uma ACV que consome mais recursos.

O sistema de produtos - definido pela ISO 14041 como uma coleção de processos unitários ligados por fluxos de produtos intermediários que realizam uma ou mais funções definidas - afeta o meio ambiente através de intervenções ambientais, tais como extração de recursos ou emissão de substâncias perigosas. O elemento de base da análise de inventário é, portanto, o processo unitário. Este termo refere-se a qualquer tipo de atividade produtora de uma saída (*output*) economicamente

valiosa, (p.e., aço, eletricidade), ou o fornecimento de um serviço economicamente valioso (p.e., transporte ou gestão de resíduos). Produtos, serviços ou recursos são convertidos em outros produtos, serviços e emissões (Guinée et al, 2001).

De notar também que o processo de realização da LCI é iterativo. À medida que os dados são recolhidos, mais se aprende sobre o sistema - os requisitos de dados ou as limitações podem ser redefinidos ou pode ser necessária uma mudança nos procedimentos de recolha, a fim de cumprir o objetivo do estudo. Por vezes, podem ser identificados problemas que requerem revisões da definição do objetivo ou do âmbito. A LCI é apresentada como uma tabela com uma lista de todos os *inputs/outputs* de materiais e energia do sistema.

3.2.1. Recolha de dados

Esta etapa inclui a recolha de dados quantitativos e qualitativos para cada processo unitário do sistema. Na ISO 1404, é descrita a etapa cuja tarefa é relacionar todos os *inputs/outputs* com um fluxo de referência. Os dados de cada processo unitário são classificados da seguinte forma (PE Int'l, GaBi, 2014): *inputs* energéticos; *inputs* de matérias-primas; *inputs* auxiliares; outros *inputs* físicos; produtos; co-produtos; resíduos; emissões para a atmosfera, água e solo; outros aspectos ambientais.

A norma EN 15804 (compatível com EPDs) exige a declaração das seguintes categorias de impacto, sendo 24 os indicadores ambientais nela utilizados: i) indicadores de impacto ambiental (7); ii) indicadores de recursos (10); iii) indicadores de resíduos (3); iv) indicadores de fluxo de saída (4).

Os Indicadores ambientais utilizados na presente ACV seguiram esta metodologia, a qual serviu para inventariar os *inputs/outputs* dos fluxos de processo da fase pós-produção, i.e., da etapa do ciclo de vida *gate to grave* (*downstream*: jusante). Esses indicadores - impacto ambiental, de recursos e de resíduos - são apresentados no Anexo A2 (Indicadores da Declaração Ambiental de Produto - Sistemas de Impermeabilização de Coberturas, com Membranas Betuminosas Totalmente Aderidas, (Imperialum, 2013). Os valores representam os *inputs/outputs* da ACV detalhada que faz parte da Declaração Ambiental de Produto.

3.2.2. Cálculo do Inventário do Ciclo de Vida

A recolha de dados de processos produz uma base de dados. Segundo Guinée et al. (2001), o acto de relacionar quantitativamente estes processos, dimensionado para o fluxo de referência na sequência da unidade funcional, é aqui referido como o método de cálculo. Antes de calcular o inventário de ciclo de vida, os três seguintes passos são realizados (PE Int'l, GaBi, 2014):

- Validação de dados: a validação dos dados recolhidos é um processo contínuo, que pode ser realizado com balanços de massa ou de energia, bem como recorrendo a comparação com dados semelhantes.
- Relacionar dados com processos unitários;
- Relacionar dados com a unidade funcional.

Estes passos são necessários para gerar o LCI para cada unidade de processo e para o sistema de produtos global. O LCI de todo o sistema de produtos é a soma de todos os LCIs de todos os processos envolvidos, sendo calculado utilizando o *software GaBi*, i.e, o LCI de todo o sistema é gerado automaticamente quando um sistema de processos é configurado. Além disso, LCIs de uma enorme variedade de processos estão armazenados em bases de dados (PE Int'l, GaBi, 2014).

3.3. AVALIAÇÃO DO IMPACTE DE CICLO DE VIDA (LCIA)

A Avaliação de Impacte do Ciclo de Vida (LCIA: Life Cycle Impact Assessment) identifica e avalia a quantidade e a importância dos potenciais impactes ambientais decorrentes da LCI. Os *inputs/outputs* são atribuídos primeiro às categorias de impacto e os seus potenciais impactes quantificados de acordo com factores de caracterização.

De acordo com a norma ISO 14040, a LCIA - terceira fase da avaliação do ciclo de vida - tem como objetivo compreender e avaliar a magnitude e a importância dos impactes ambientais potenciais de um sistema de produtos. Na mesma linha, o primeiro *SETAC-Europe Working Group on Impact assessment (WIA-1)* define LCIA como "um processo quantitativo e/ou qualitativo para identificar, caracterizar e avaliar os potenciais impactes das intervenções ambientais identificadas na análise de inventário".

A Figura 3.11 exemplifica a conversão utilizada das emissões para impactes potenciais via classificação e caracterização (PE Int'l, GaBi, 2014):

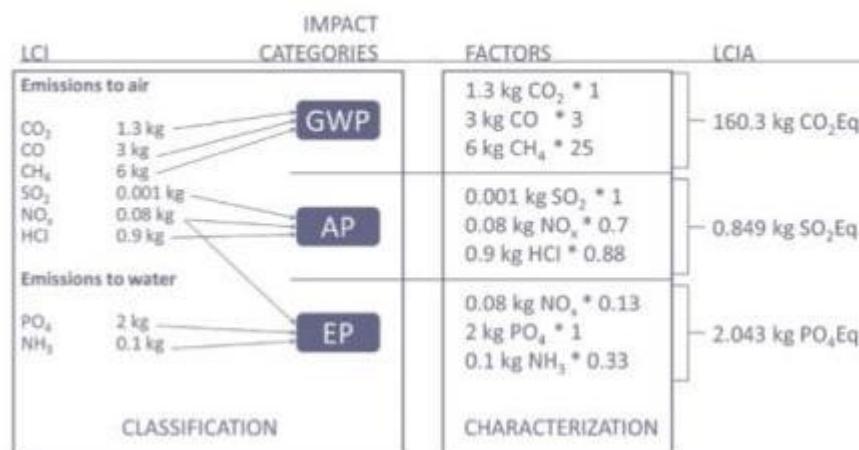


Figura 3.11 - Conversão de emissões para impactes potenciais via classificação e caracterização (PE Int'l, GaBi, 2014).

- Classificação: os resultados da fase de Inventário de Ciclo de Vida (LCI) incluem muitas e diferentes emissões. Após as categorias de impacte relevantes serem seleccionadas, os resultados LCI são atribuídos a uma ou mais dessas categorias.
- Caracterização: descreve e quantifica o impacte ambiental do sistema de produtos analisado. Depois de atribuir os resultados do LCI às categorias de impacte, factores de caracterização terão que ser aplicados às quantidades relevantes. Os factores de caracterização estão incluídos nos métodos de categoria de impacte seleccionados, como o CML, sendo convertidos em unidades de referência, utilizando factores de caracterização. Por exemplo, a substância de referência para a categoria de impacte "potencial de aquecimento global" (GWP) é o CO₂ e a unidade de referência é definida como "kg CO₂-equivalente". Todas as emissões que contribuem para o aquecimento global são convertidas em "kg CO₂ equivalentes", de acordo com o factor de caracterização relevante. Cada emissão tem o seu próprio factor de caracterização.

Na Tabela 3.8 são mostrados os métodos de caracterização ambiental disponíveis no *software GaBi* (PE Int'l, GaBi, 2014). Relativamente à selecção dos métodos de caracterização, há que distinguir entre indicadores de categoria, modelos e factores de caracterização. As intervenções gravadas na tabela de inventário são quantificadas em termos de um indicador de categoria comum. Para este fim são utilizados modelos de caracterização, a partir dos quais são derivados factores de caracterização para os poluentes individuais e assim por diante. Para uma dada categoria de impacte, um método de caracterização compreende um indicador de categoria, um modelo para caracterização e factores de caracterização derivados do modelo.

Tabela 3.8 - Métodos de caracterização ambiental disponíveis no *software GaBi* (PE Int'l, GaBi, 2014).



A norma ISO 14042 descreve procedimentos, em vez de metodologias específicas ou modelos de avaliação do impacto do ciclo de vida, o que implica que qualquer metodologia ou modelo é aceitável, desde que os mesmos satisfaçam os seus critérios gerais. A Figura 3.12 resume o quadro geral da LCIA, mostrando a relação entre os resultados do inventário de ciclo de vida, categorias de impacto, indicadores de categoria e *endpoint(s)* de categoria, ilustrando esses conceitos com referência à categoria de impacto "Acidificação":

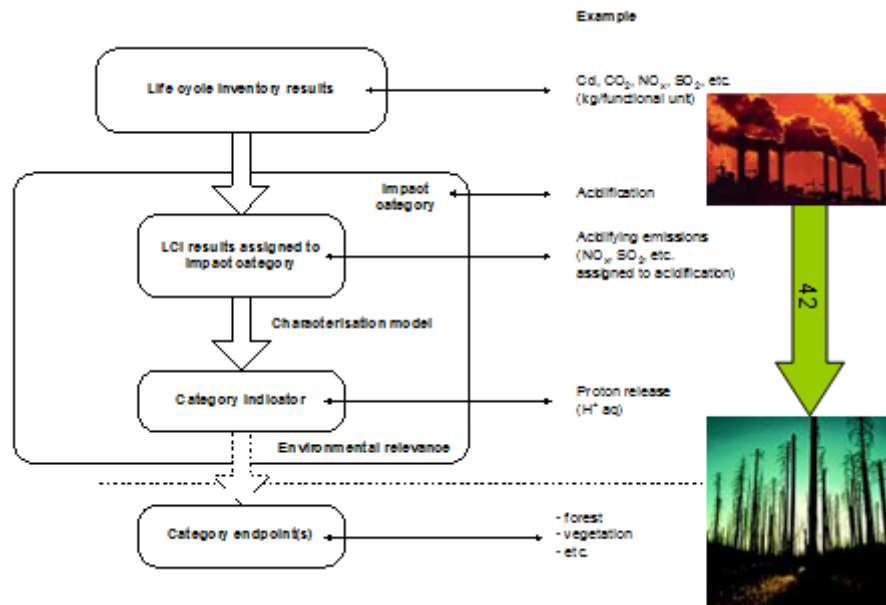


Figura 3.12 - Quadro conceptual para a definição de indicadores de categoria de impacto "Acidificação" (ligeiramente adaptado de: ISO 14042). (UNEP LCA Training Kit; Module e – Impact assessment)

No âmbito de um estudo de ACV, certos elementos são definidos pela LCIA. Elementos obrigatórios incluem a seleção de categorias de impacto relevantes, classificação e caracterização. Os elementos opcionais do estudo são a normalização, agrupamento e ponderação.

De acordo com a ISO 14042, os modelos da fase LCIA selecionam questões ambientais, designadas categorias de impacto, e utilizam indicadores de categoria para condensar e explicar os resultados do LCI. Indicadores de categoria destinam-se a reflectir as emissões agregadas ou a utilização de recursos para cada categoria de impacto. Estes indicadores de categoria representam os potenciais impactos ambientais discutidos na norma ISO 14040.

A ISO 14042 define também o termo "mecanismo ambiental" - um sistema de processos físicos, químicos e biológicos para uma determinada categoria de impacto, ligando os resultados do LCI aos indicadores da categoria e *endpoints* de categoria.

3.3.1. Métodos de avaliação de impacto

Diferentes métodos podem ser utilizados para realizar uma Avaliação do Impacte do Ciclo de Vida (LCIA). Esses métodos são continuamente pesquisados e desenvolvidos por diferentes grupos científicos baseados em diferentes metodologias. Em métodos de avaliação de impacto do ciclo de vida - como TRACI ou CML - duas abordagens principais são adotadas para classificar e caracterizar os impactos ambientais: a abordagem orientada para o problema (*mid point*) e a abordagem orientada para danos (*end point*) (PE Int'l, GaBi, 2014).

Na abordagem orientada para o problema, os fluxos são classificados como pertencentes a categorias de impacto ambiental para os quais contribuem. Com a ajuda dos métodos CML e TRACI, mais de mil substâncias são classificadas e caracterizadas de acordo com a medida em que elas contribuem para uma lista de categorias de impacto ambiental.

O conhecido método CML é a metodologia do *Centre for Environmental Studies (CML) of the University of Leiden* (Holanda) e centra-se numa série de categorias de impacto ambiental, expressas em termos de emissões para o meio ambiente. O método CML inclui a classificação, caracterização e normalização. As categorias de impacto para o "potencial de

aquecimento global” (GWP) e “esgotamento da camada de ozono” (ODP) são baseadas nos factores do IPCC (*Intergovernmental Panel on Climate Change*).

Outro método consiste na ferramenta *Tool for the Reduction and Assessment of Chemical and other Environmental Impacts* (TRACI). Este método orientado para problemas é desenvolvido pela *U.S. Environmental Protection Agency* (EPA), sendo utilizado principalmente nos EUA. Os métodos orientados para danos também começam pela classificação de fluxos de um sistema em várias categorias de impacto, mas as categorias de impacto são depois agrupadas em categorias *endpoint*, tais como: danos à saúde humana, danos à qualidade do ecossistema e danos aos recursos. *EcolIndicator99* é um exemplo de um método orientado para danos. Os *endpoints* utilizados são mais fáceis de interpretar e comunicar.

O método de Avaliação de Impacte Ambiental (LCIA) utilizado na presente ACV é o seguinte:

- *CML 2001 Characterization factors: version 3.9 (November 2010)* (Tabela 3.9).

Este método é proposto na RCP (Regras de Categoria de Produto; PCR: *Product Category Rules according to ISO 14025; Product group classification: Multiple UN CPC codes construction products and construction services*) (PCR, 2015) e também é utilizado na ACV detalhada que faz parte da EPD (Declaração Ambiental de Produto: Sistemas de Impermeabilização de Coberturas, com Membranas Betuminosas Totalmente Aderidas) (Imperialum, 2013), a qual serviu de base à concepção do modelo na etapa *gate to grave*, recorrendo a várias simplificações já expostas..

Tabela 3.9 – Método CML 2001: Characterization factors: version 3.9 (November 2010) (PE Int'l, GaBi, 2014).

CML 2001 - Nov. 2010
CML2001 - Nov. 2010, Abiotic Depletion (ADP elements)
CML2001 - Nov. 2010, Abiotic Depletion (ADP fossil)
CML2001 - Nov. 2010, Acidification Potential (AP)
CML2001 - Nov. 2010, Eutrophication Potential (EP)
CML2001 - Nov. 2010, Freshwater Aquatic Ecotoxicity Pot. (FAETP inf.)
CML2001 - Nov. 2010, Global Warming Potential (GWP 100 years)
CML2001 - Nov. 2010, Global Warming Potential, excl biogenic carbon (GWP 100 years)
CML2001 - Nov. 2010, Human Toxicity Potential (HTP inf.)
CML2001 - Nov. 2010, Marine Aquatic Ecotoxicity Pot. (MAETP inf.)
CML2001 - Nov. 2010, Ozone Layer Depletion Potential (ODP, steady state)
CML2001 - Nov. 2010, Photochem. Ozone Creation Potential (POCP)
CML2001 - Nov. 2010, Terrestrial Ecotoxicity Potential (TETP inf.)

De notar que, segundo as RCP (Regras de Categoria de Produto) (2015), o impacto ambiental por unidade declarada para as seguintes categorias de impacto ambiental deve ser comunicado em EPDs, dividido em módulos do ciclo de vida A a C e D se relevante, de acordo com a norma EN 15804:

- aquecimento global, kg CO₂equivalentes (GWP100)
- carbono biogénico armazenado em produtos, kg CO₂e equivalentes (opcional)
- destruição da camada de ozono, kg CFC 11 equivalentes
- acidificação do solo e da água, SO₂ equivalentes
- eutrofização, PO₄3 equivalentes
- criação de ozono fotoquímico, C₂H₂ equivalentes
- esgotamento de recursos abióticos (elementos), kg Sb equivalentes
- esgotamento de recursos abióticos (fósseis), MJ valor calorífico líquido (*net calorific value*)

Também se deve verificar sempre a última alteração à EN 15804, para ter a certeza que se utilizam os factores de caracterização corretos. As categorias de impacto devem ser calculadas utilizando factores de caracterização recomendados nos métodos de avaliação do impacto regionalmente aceites. Na Europa, devem ser utilizados os factores de caracterização descritos na EN 15804 (*CML baseline*), ou outros melhorados se atualizados numa revisão da EN 15804.

3.3.2. Seleção das categorias de impacto

A escolha de categorias de impacto depende do objetivo do estudo de ACV, devendo abranger os efeitos ambientais do sistema de produtos analisado (PE Int'l, GaBi, 2014).

Na Tabela A.2 do Anexo A2 (Indicadores da Declaração Ambiental de Produto - Sistemas de Impermeabilização de Coberturas, com Membranas Betuminosas Totalmente Aderidas, (Imperialum, 2013)), são apresentadas as categorias de impacto ambiental seleccionadas, bem como os respectivos indicadores. A sua descrição detalhada é feita em:

- “Suplemento A - Descrição de resultados e de categorias de impacto” do documento disponível *online* - *GaBi Database & Modelling Principles 2014* (PE Int'l, GaBi, 2014). Esse suplemento descreve as metodologias de avaliação de impacto disponíveis na ferramenta *GaBi* após a atualização de 2013. A descrição é dividida em categorias gerais de impacto e a abordagem de cada uma das metodologias de impacto disponíveis também é descrita.

De acordo com a ISO 14042, os indicadores da categoria podem ser escolhidos em qualquer lugar ao longo do “mecanismo ambiental” entre a intervenção e o *endpoint*. A operacionalização de cada uma das categorias de impacto escolhidas compreende os seguintes elementos: **i)** identificação de um ou mais *endpoints* de categoria; **ii)** definição de um indicador de categoria para cada um desses *endpoints*; **iii)** identificação dos resultados LCI a ser atribuídos a cada indicador de categoria, tendo em conta o(s) *endpoint(s)* de categoria selecionada; **iv)** identificação do modelo para caracterização e factores de caracterização a ser utilizados. A ISO 14042 declara que este procedimento facilita a recolha, atribuição, e modelação de resultados LCI adequados e ajuda a realçar a validade científica e técnica, pressupostos, escolhas de valor e grau de precisão no modelo.

Na fase de avaliação do impacto, os resultados da análise de inventário são traduzidos em contribuições (*contributors*) para categorias de impacto relevantes, tais como: esgotamento dos recursos abióticos, alterações climáticas, acidificação, etc. Para este fim, as categorias de impacto relevantes devem ser identificadas. O texto da ISO 14042 pode ser interpretado como indicando que estas categorias de impacto devem ser definidas para cada novo estudo. Para facilitar o trabalho dos participantes de ACV, Guinée et al. (2001) elaboraram uma lista padrão de categorias de impacto, distinguindo assim, entre **i)** categorias de impacto *baseline*; **ii)** categorias de impacto “específicas do estudo”; **iii)** “outras” categorias de impacto.

A ISO 14042 não fornece uma lista padrão de categorias de impacto para inclusão na LCIA. Ao elaborar a abordagem orientada para problemas (*problem-oriented approach*), uma lista padrão de categorias de impacto tem de ser inicialmente definida. Guinée et al. (2001) 20 apresenta uma lista de categorias e subcategorias de impacto desse tipo, baseada principalmente no trabalho do *WIA-2 Working Group on Impact assessment*. Essa lista padrão reconhece três grupos de categoria de impacto:

- Grupo A: incluídas em quase todos os estudos de ACV;
- Grupo B: “específicas de estudo” compreendem categorias que possam merecer a inclusão, dependendo do objetivo e âmbito da ACV e da disponibilidade de dados apropriados, e para as quais é proposta uma *baseline* e/ou método de caracterização alternativo;
- Grupo C: “outras categorias de impacto” requerem elaboração adicional antes que possam ser utilizados em estudos de ACV.

3.3.3 Análise de Energia do Ciclo de Vida (LCEA): energia operacional

Análise de Energia do Ciclo de Vida (LCEA: *Life Cycle Energy Analysis*) faz parte integrante duma ACV e é definida como uma abordagem em que todas as necessidades energéticas de determinado produto são contabilizadas. Os edifícios consomem energia direta ou indiretamente em todas as fases do seu ciclo de vida, desde o “berço até o túmulo” (*cradle to the grave*), existindo interação entre as fases (energia incorporada e energia operacional). Por isso, precisam ser analisados do ponto de vista do ciclo de vida.

Relativamente à energia operacional, no presente capítulo é feita uma análise dos resultados de duas dissertações de mestrado desenvolvidas no Instituto Superior Técnico (Lisboa):

- Simulação Energética de Coberturas Verdes (Rocha e Silva, 2014) (baseada na avaliação experimental realizada na dissertação seguinte);
- Avaliação Experimental do Comportamento Térmico de Coberturas Verdes (Valadas, 2014).

Segundo Rocha e Silva (2014), as coberturas verdes constituem uma solução para aumentar a área verde no meio urbano, para adaptar as cidades às condições climáticas extremas e para redução do consumo de energia do sistema de climatização e das emissões de CO₂. O autor desenvolve um estudo, cujo objetivo é analisar o impacto das coberturas verdes no desempenho energético dos edifícios, utilizando o programa computacional de simulação energética *EnergyPlus*, que possui um modelo de coberturas verdes desenvolvido por Sailor (2008). Este modelo possibilita a definição de vários parâmetros, nomeadamente a altura das plantas, a densidade da vegetação (LAI) e a espessura do substrato.

O autor realizou uma validação do modelo utilizando resultados das campanhas de monitorização efetuadas por Valadas (2014) em três edifícios localizados em Lisboa com coberturas verdes (Tabela 3.10), revelando que o modelo simula corretamente esta solução construtiva. Foram investigadas as poupanças de energia do sistema de climatização de três tipologias de coberturas verdes (extensiva, semi-intensiva e intensiva) relativamente a uma cobertura escura e a uma cobertura clara, para os três casos de estudo, localizados em Lisboa, e para vários níveis de isolamento térmico da cobertura.

Na Tabela 3.10 é apresentada a comparação de 2 soluções (cobertura verde extensiva vs cobertura "branca") das referidas teses, aplicando posteriormente as aproximações decorrentes dessa análise às coberturas (verde extensiva vs "branca" convencional) da presente ACV, tendo em consideração um isolamento térmico (XPS) com 6cm de espessura.

Tabela 3.10 - Comparação de 2 soluções (cobertura verde extensiva vs cobertura "branca" convencional), para 3 casos de estudo localizados em Lisboa (adaptado de Rocha e Silva, 2014).

Table 5 - Technical sound room energy consumptions for the five roof solutions (kWh/year/m ²)													XPS= 6cm					
XPS (cm)	Extensive			White			Comp extensive-white			Comp extensive-white %			Comp extensive-white %					
	Heat.	Cool.	Total	Heat.	Cool.	Total	Heat.	Cool.	Total	Heat.	Cool.	Total	Heat.	Cool.	Total			
0	17,5	55,2	72,7	60,5	13,3	73,7	-43,00	41,90	-1,00	-71,1%	315,0%	-1,4%						
2	8,7	42,9	51,6	30,3	10,8	41,0	-21,60	32,10	10,60	-71,3%	297,2%	25,9%						
4	5,6	34,7	40,3	19,8	10,9	30,7	-14,20	23,80	9,60	-71,7%	218,3%	31,3%	-72,1%	180,0%	32,9%			
8	3,1	27,3	30,4	11,3	11,3	22,6	-8,20	16,00	7,80	-72,6%	141,6%	34,5%						
Table 6 – Rehearsal room energy consumptions for the five roof solutions (kWh/year/m ²)																		
XPS (cm)	Extensive			White			Comp extensive-white			Comp extensive-white %			Comp extensive-white %					
	Heat.	Cool.	Total	Heat.	Cool.	Total	Heat.	Cool.	Total	Heat.	Cool.	Total	Heat.	Cool.	Total			
0		5,8	54,3	60,1	13,4	34,1	47,6	-7,60	20,20	12,50	-56,7%	59,2%	26,3%					
2		4,3	51	55,4	9,2	35,2	44,4	-4,90	15,80	11,00	-53,3%	44,9%	24,8%					
4		3,7	49,1	52,7	7,1	36,2	43,3	-3,40	12,90	9,40	-47,9%	35,6%	21,7%	-44,5%	30,1%	19,2%		
8		3,0	46,8	49,8	5,1	37,6	42,7	-2,10	9,20	7,10	-41,2%	24,5%	16,6%					
Table 7 – Conference room energy consumptions for the five roof solutions (kWh/year/m ²)																		
XPS (cm)	Extensive			White			Comp extensive-white			Comp extensive-white %			Comp extensive-white %					
	Heat.	Cool.	Total	Heat.	Cool.	Total	Heat.	Cool.	Total	Heat.	Cool.	Total	Heat.	Cool.	Total			
0		17,7	51,8	69,5	27	36,9	63,9	-9,30	14,90	5,60	-34,4%	40,4%	8,8%					
2		15,9	46,6	62,4	20,4	38,5	58,8	-4,50	8,10	3,60	-22,1%	21,0%	6,1%					
4		15,4	45,1	60,5	18,5	39,3	57,8	-3,10	5,80	2,70	-16,8%	14,8%	4,7%	-14,5%	12,4%	4,0%		
8		15,1	43,9	59,0	17,2	39,9	57,1	-2,10	4,00	1,90	-12,2%	10,0%	3,3%					
													MEDIA			-43,7%	74,1%	18,7%

Visualizando a Tabela 20 e a Figura 3.14, pode-se concluir o seguinte na comparação "cobertura verde extensiva" vs "cobertura branca convencional": i) uma redução de 43.7% no consumo de energia de aquecimento; ii) um acréscimo de 74.1% no consumo de energia de arrefecimento; iii) um acréscimo de 18.7% no consumo de energia total.

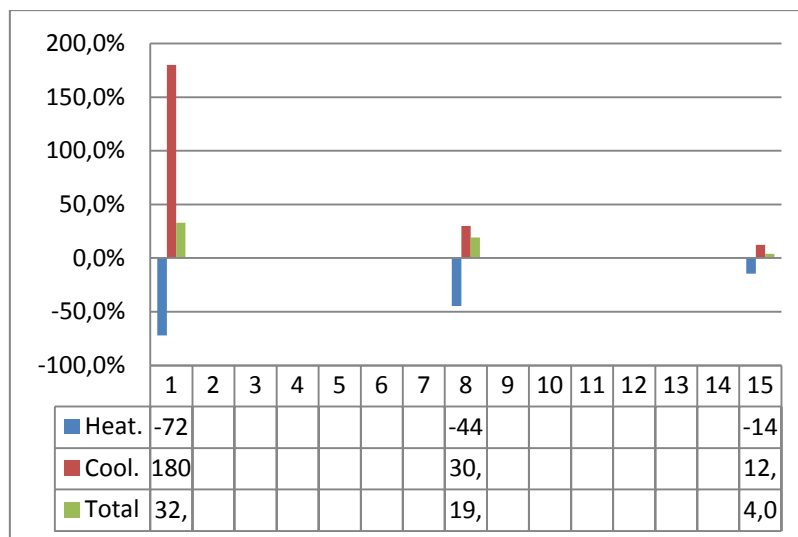


Figura 3.13 – Comparação das 2 soluções (cobertura verde extensiva vs cobertura branca convencional) (isolamento térmico XPS=6cm) para 3 casos de estudo, localizados em Lisboa.

Os resultados apresentados por Rocha e Silva (2014) demonstraram que as coberturas verdes semi-intensiva e intensiva podem reduzir os consumos de energia, principalmente para níveis de isolamento térmico inferiores, quando comparados com as coberturas escuras e claras. Pelo contrário, as coberturas extensivas apenas revelaram ser um benefício para a redução dos consumos energéticos relativamente a coberturas escuras e não isoladas termicamente, sugerindo serem uma solução para edifícios antigos.

O desempenho ambiental (e energético) das componentes avaliadas depende da localização geográfica do edifício onde estas se integram. Por isso, assumiu-se que estas são parte integrante dum edifício genérico (não construído), localizado em Lisboa, (Portugal). Os dados climáticos desse edifício “projeto” correspondem a um clima temperado com Verão quente e seco (Csa), segundo classificação climática de Köppen-Geiger.

A ACV da presente dissertação foi aplicada a duas coberturas planas, componentes integrantes de um edifício dum edifício genérico (não construído), localizado em Lisboa (Portugal), cujo desempenho térmico é equivalente à média dos 3 casos de estudo realizados em Lisboa, para as 2 soluções analisadas (cobertura verde extensiva vs cobertura branca convencional, XPS=6cm). Lisboa goza dum clima temperado com Verão quente e seco (Csa), segundo a classificação climática de Köppen-Geiger. Os dados climáticos do edifício “projeto”, *inputs* necessários para o cálculo térmico, são apresentados na Tabela 3.18.

Tabela 3.11 - Dados climáticos do edifício “projeto”.

Parâmetros	Dados
Concelho	Lisboa
Altitude [m]	50
Zona climática [Inverno]	I1
Número de graus-dias de aquecimento (GD) °C.dias	1190
Duração da estação de aquecimento (M) meses	5,3
Zona climática de Verão	V2
Amplitude térmica [°C]	11

A metodologia de cálculo utilizada na análise térmica recorreu ao cálculo simplificado, segundo a regulamentação térmica nacional (RCCTE (2006); REH (2013)), tendo em conta as condutibilidades térmicas dos materiais constituintes das coberturas (Tabelas 3 e 4) (Pina dos Santos & Matias, 2006). Esta análise térmica utiliza as aproximações anteriormente expostas, que têm em consideração o modelo de coberturas verdes desenvolvido por Sailor (2008). Deste modo, foram obtidos os consumos energéticos na fase de utilização (Nic e Nvc; necessidades nominais de aquecimento e de arrefecimento), tendo sido depois introduzidos como *inputs* de energia operacional nos modelos criados com o *software* GaBi, considerando o tempo de vida útil das coberturas analisadas (90 anos).

3.3.4. Elementos opcionais numa ACV

Normalização, avaliação, agrupamento e ponderação são todos os elementos opcionais que podem ser executados para facilitar a interpretação dos resultados da LCIA. É essencial que essas ações sejam transparentemente documentadas, considerando que outros indivíduos, organizações e sociedades podem ter diferentes preferências na exibição dos resultados e podem querer normalizar, avaliar, agrupar ou ponderar de forma diferente. (PE Int'l, GaBi, 2014)

De notar que os elementos opcionais serão brevemente descritos de seguida (PE Int'l, GaBi, 2014), mas não fazem parte integrante da presente ACV, que apenas inclui os elementos obrigatórios: seleção de categorias de impacto relevantes, classificação e caracterização..

3.3.4.1. Normalização

A normalização envolve a exibição da magnitude dos resultados do indicador de impacto em relação a um montante de referência. Por exemplo, isto pode ser feito por comparação com um sistema de referência. Os potenciais de impacto quantificam o potencial para impactos ecológicos específicos. No passo “normalização”, os resultados da categoria de impacto são comparados com as referências, a fim de distinguir o que é normal ou não. Para a normalização, são utilizadas quantidades de referência para uma região de referência ou país, durante um período de tempo. Os resultados dos indicadores de impacto normalizados são entidades não dimensionais que permitam a comparação entre diferentes categorias de impacto. Os resultados normalizados de todas as categorias de impacto escolhidas podem também ser apresentado num único gráfico, uma vez que já não têm diferentes unidades físicas (PE Int'l, GaBi, 2014).

3.3.4.2. Agrupamento

O agrupamento envolve a triagem e classificação das categorias de impacto. É um elemento opcional com duas abordagens possíveis. As categorias de impacto podem ser classificadas numa base nominal por características tais como *inputs* e *outputs* ou escalas espaciais globais, regionais ou locais. As categorias de impacto podem também ser classificadas numa determinada hierarquia, p.e., alta, média e baixa prioridade. O *ranking* é baseado em escolhas de valor. Diferentes indivíduos, organizações e sociedades podem ter diferentes preferências. Portanto, é possível que diferentes partes cheguem a diferentes resultados de *ranking*, com base nos mesmos resultados dos indicadores ou nos resultados dos indicadores normalizados (PE Int'l, GaBi, 2014).

3.3.4.3. Ponderação

A ponderação é um elemento opcional da ACV e é baseada em escolhas de valor e não em princípios científicos. A ponderação é utilizada para comparar diferentes resultados de indicadores de impacto, de acordo com o seu significado. Essa ponderação da importância de uma categoria de impacto é expressa através dos fatores de ponderação. Esses fatores de ponderação são avaliados através de inquéritos entre os diferentes grupos. A ponderação também pode ser utilizada para agregar resultados de indicadores de impacto ponderados para um único resultado do *score*. (PE Int'l, GaBi, 2014)

4. INTERPRETAÇÃO DE RESULTADOS

A fase de interpretação faz parte integrante duma ACV, mostrando os resultados desta e as conclusões e recomendações para a tomada de decisão. A organização deste capítulo segue a estrutura metodológica apresentada na documentação do *software GaBi* utilizado nesta dissertação (PE Int'l, GaBi, 2014), excluindo as conclusões finais e recomendações, que serão apresentadas no Capítulo 5.

A interpretação do ciclo de vida é um processo iterativo, no qual os resultados são verificados e avaliados, devendo ser consistentes com os requisitos do objetivo e âmbito do estudo. Esta fase inclui três etapas principais (PE Int'l, GaBi, 2014): i) Identificação de questões significativas; ii) avaliação (avaliar metodologia e resultados na integralidade, sensibilidade e consistência; elaborar conclusões preliminares e verificar se são consistentes); iii) conclusões finais e recomendações (Capítulo 5) (se as conclusões forem consistentes serão consideradas como conclusões finais, sendo feitas recomendações para o público-alvo da ACV).

4.1. IDENTIFICAÇÃO DE QUESTÕES SIGNIFICATIVAS

A primeira etapa da fase de Interpretação do Ciclo de Vida consiste na estruturação dos resultados da LCI e da LCIA, e na identificação de "questões importantes" ou elementos de dados que contribuam de forma mais significativa para os resultados. Devido à grande quantidade de dados recolhidos é apenas possível - dentro de prazos e recursos aceitáveis - avaliar os elementos de dados que contribuem significativamente para o alcance dos resultados. Problemas significativos podem incluir: i) elementos de inventário, tais como o consumo de energia, grandes fluxos de materiais, resíduos e emissões; ii) indicadores de categoria de impacto que são de especial interesse ou cuja quantidade é motivo de preocupação; iii) contribuições essenciais das etapas do ciclo de vida para os resultados, tais como processos unitários individuais ou grupos de processos.

4.1.1. Elementos do Inventário de Ciclo de Vida (LCI)

A Tabela 4.1 apresenta os resultados do Inventário do Ciclo de Vida (LCI) estruturados em duas categorias: as duas etapas do ciclo de vida UPSTREAM_CORE e DOWNSTREAM. De entre todos os fluxos, os recursos materiais/energéticos e as emissões para a água são aqueles que apresentam valores mais significativos em termos de massa (Kg), ocorrendo principalmente durante a etapa DOWNSTREAM (*cradle to gate*). Isso deve-se ao "peso" substancial do consumo de energia térmica da componente do edifício durante a sua fase de utilização (90 anos), modelado em detalhe no processo *Electricity grid mix*.

Tabela 4.1 – Fluxos significativos Gabi da cobertura verde extensiva.

	Cobertura verde extensiva (Fluxos de input/output)			
	Mass Kg	TOTAL	UPSTREAM_CORE	DOWNSTREAM
Resources		4 497 892,72	9 567,82	4 488 324,90
Deposited goods		1 476,56	35,84	1 440,72
Emissions to air		48 358,93	222,72	48 136,21
Emissions to fresh water		4 445 188,46	9 431,72	4 435 756,73
Emissions to sea water		2 785,40	14,46	2 770,94

4.1.1.1. Recursos materiais

A Tabela 4.2 representa os resultados do Inventário do Ciclo de Vida (LCI) relativos aos recursos materiais utilizados ao longo do ciclo de vida da cobertura verde extensiva, expressos em Kg (RSL: *Reference Service Life*= 90 anos).

Tabela 4.2 - Recursos materiais (cobertura verde extensiva).

Mass Kg	Cobertura verde extensiva (Recursos materiais)		
	TOTAL	UPSTREAM_CORE	DOWNSTREAM
Resources	4 497 892,72	9 770,79	4 488 324,90
Energy resources	590,45	16,92	573,54
Non renewable energy resources	590,45	16,92	573,54
Crude oil (resource)	60,82	10,45	50,37
Hard coal (resource)	284,03	1,16	282,87
Lignite (resource)	9,44	1,86	7,58
Natural gas (resource)	236,14	3,44	232,69
Peat (resource)	0,030125	0,004947	0,025178
Uranium (resource)	0,002333	0,000027	0,002307
Material resources	4 497 302,27	9 753,87	4 487 751,37
Non renewable elements	1,320172	1,342747	-0,022575
Non renewable resources	1 553,24	55,26	1 700,95
Renewable resources	4 495 747,71	9 697,27	4 486 050,44
Water	4484682,11	9628,742679	4475053,367
Water	60,7550957	60,7550957	0
Water (fresh water)	28,64	0	28,64
Water (ground water)	1 241,58	54,74	1 186,84
Water (lake water)	1 000 237,74	225,82	1 000 011,92
Water (rain water)	6 529,50	44,39	6 485,11
Water (river water)	3 473 860,57	9 209,42	3 464 651,14
Water (sea water)	2 723,16	33,45	2 689,70
Water (well water)	0,1687014	0,168701401	0,00
Air	10 714,64	67,14	10 647,51
Carbon dioxide	350,36	1,09	349,27
Nitrogen	0,29455097	0,294550956	1,37E-08
Oxygen	0,30714761	0,005943213	0,3012044
Primary forest	2,36E-06	2,35E-06	5,44E-09

Os recursos materiais renováveis - particularmente o recurso “água” (água dos lagos, água dos rios) - apresentam os valores mais significativos em termos de massa, ocorrendo principalmente durante a etapa do ciclo de vida DOWNSTREAM. Como já foi referido, isso deve-se ao “peso” da do consumo de energia térmica da componente do edifício (cobertura verde extensiva) durante a fase de utilização.

4.1.1.2. Resíduos

A Tabela 4.3 representa os resultados do Inventário do Ciclo de Vida (LCI) relativos aos resíduos do ciclo de vida da cobertura verde extensiva avaliada (RSL: Reference Service Life= 90 anos).

Tabela 4.3 – Resíduos do ciclo de vida da cobertura verde extensiva.

Mass Kg	Cobertura verde extensiva (Resíduos)		
	TOTAL	UPSTREAM_CORE	DOWNSTREAM
Production residues in life cycle	10,09	0,01	10,08
Hazardous waste for disposal	0,017522	0,004342	0,013180
Waste for disposal	10,07	0,00	10,07
Waste for recovery	0,006584	0,006584	0,000000
Deposited goods	1 476,55	35,83	1 440,72
Consumer waste	0,005136	0,005136	0,000000
Hazardous waste	0,001831	0,001831	0,000000
Radioactive waste	0,422808	0,004845	0,417963
Stockpile goods	1 476,12	35,82	1 440,30
Demolition waste (deposited)	3,08E-06	3,08E-06	0,00
Hazardous waste (deposited)	0,0162329	5,51E-05	0,016177842
Overburden (deposited)	1 411,81	34,39	1 377,42
Spoil (deposited)	41,48	0,12	41,36
Tailings (deposited)	6,58	0,18	6,39
Waste (deposited)	16,23	1,12	15,11

Os resíduos designados de *deposited goods* (bens depositados), particularmente os *stockpile goods - overburden deposited* (pilhas de stocks - sobrecargas depositadas) apresentam os valores mais significativos em termos de massa, ocorrendo principalmente durante a etapa do ciclo de vida DOWNSTREAM. PE Int'l, GaBi (2014) define os fluxos elementares designados de “pilhas de stocks - sobrecargas depositadas” como materiais normalmente não contaminados, tais como solos ou rochas removidos por processos de mineração (p.e., hulha, lignite e minérios).

4.1.1.3. Emissões

A Tabela 4.4 representa os resultados do Inventário do Ciclo de Vida (LCI) relativos às emissões do ciclo de vida da cobertura verde extensiva avaliada (RSL: *Reference Service Life*= 90 anos).

Tabela 4.4 - Emissões do ciclo de vida da cobertura verde extensiva.

Mass Kg	Cobertura verde extensiva (Emissões)		
	TOTAL	UPSTREAM_CORE	DOWNSTREAM
Emissions to air	48 358,93	222,72	48 136,21
Heavy metals to air	0,005377	0,000032	0,005345
Inorganic emissions to air	39 107,59	129,83	38 977,77
Organic emissions to air (group VOC)	6,00	0,10	5,90
Other emissions to air	9 244,93	92,79	9 152,13
Particles to air	0,408106	0,007229	0,400877
Pesticides to air	0,000014	0,000000	0,000014
Radioactive emissions to air	0,000000	0,000000	0,000000
Emissions to fresh water	4 445 188,46	9 431,72	4 435 756,73
Analytical measures to fresh water	2,44	0,01	2,43
Heavy metals to fresh water	0,024751	0,003973	0,020778
Inorganic emissions to fresh water	10,14	0,75	9,39
Organic emissions to fresh water	0,471243	0,003450	0,467793
Other emissions to fresh water	4 445 170,56	9 430,90	4 435 739,66
Pesticides to fresh water	0,000011	0,000000	0,000011
Detergent (unspecified)	0,000000	0,000000	0,000000
Unused primary energy from geothermal	0,000000	0,000000	0,000000
Unused primary energy from hydro power	0,000000	0,000000	0,000000
Waste heat	0,000000	0,000000	0,000000
Water (groundwater from technosphere, waste water)	0,002092	0,000037	0,002056
Water (river water from technosphere, cooling water)	94 204,56	256,04	93 948,52
Water (river water from technosphere, rain water)	0,775547	0,775547	0,000000
Water (river water from technosphere, turbinada)	4 350 172,69	9 143,57	4 341 029,12
Water (river water from technosphere, waste water)	792,53	30,51	762,02
Particles to fresh water	4,82	0,06	4,77
Radioactive emissions to fresh water	0,000000	0,000000	0,000000
Emissions to sea water	2 785,40	14,46	2 770,94
Analytical measures to sea water	0,00	0,00	0,00
Heavy metals to sea water	0,000285	0,000029	0,000255
Inorganic emissions to sea water	2,93	0,26	2,66
Organic emissions to sea water	0,001740	0,000156	0,001584
Other emissions to sea water	2 782,41	14,20	2 768,22
Waste heat	0,000000	0,000000	0,000000
Water (sea water from technosphere, cooling water)	2 681,52	11,17	2 670,35
Water (sea water from technosphere, waste water)	100,89	3,03	97,86
Particles to sea water	0,055390	0,003272	0,052118
Radioactive emissions to sea water	0,000000	0,000000	0,000000
Emissions to agricultural soil	0,000437	0,000018	0,000419
Emissions to industrial soil	0,017076	0,000069	0,017007

Observa-se que as as “emissões para a água doce” (*emissions to fresh water*), particularmente “água – água do rio da tecnosfera, turbinada” (*water - river water from technosphere, turbinada*) apresentam os valores mais significativos em termos de massa, ocorrendo principalmente durante a etapa do ciclo de vida DOWNSTREAM. A utilização de água é entendida como um termo genérico abrangendo todos os tipos de utilização antropogênica da água e é geralmente diferenciada numa utilização consumista de água (i.e., consumo de água) e numa utilização degradativa de água (PE Int'l,

GaBi, 2014). Num balanço GaBi, os seguintes termos podem ser entendidos como: “utilização de água doce” = “retirada total de água doce” = água (rio) + água (lago) + água (subterrânea) + água (chuva) + água (subterrânea fóssil); “consumo de água doce” = “utilização total de água doce” (*input* de água) - “libertação total de água doce da tecnosfera (*outputs* de água). De notar também, que um dos 3 potenciais benefícios resultantes da solução construtiva de cobertura verde - a taxa de retenção média anual de água pluvial entre 52 e 61% (FLL, 2008) – não foi contabilizada na presente LCIA.

4.1.1.4. Recursos energéticos

No Capítulo 3.3.3 foram descritas as bases em que se fundamenta a Análise de Energia do Ciclo de Vida (que inclui a energia operacional), na qual foram contabilizadas todas as necessidades energéticas dos sistemas de produtos avaliados. A LCEA da presente dissertação foi aplicada a dois sistemas construtivos de coberturas, componentes de um edifício em fase de projeto (não construído) com comportamento térmico equivalente à média dos 3 casos de estudo localizados na cidade de Lisboa para duas soluções estudadas por Rocha e Silva (2014) - cobertura verde extensiva vs cobertura branca convencional (espessura de isolamento térmico XPS = 6cm).

Com base nos resultados apresentados por Rocha e Silva (2014), concluiu-se o seguinte na análise comparativa das coberturas (verde extensiva vs branca): i) uma redução de 43.7% no consumo de energia de aquecimento; ii) um acréscimo de 74.1% no consumo de energia de arrefecimento; iii) um acréscimo de 18.7% no consumo de energia total. Com base nestes valores aproximados foram obtidos os consumos energéticos anuais na fase de utilização do edifício (Nvc e Nic; necessidades nominais de arrefecimento e de aquecimento). Depois foram introduzidos como *inputs* de energia operacional no modelo criado com o *software Gabi*, considerando um tempo de vida útil das coberturas analisadas de 90 anos (Tabela 4.5). :

Rocha e Silva (2014) concluiu que: i) as coberturas verdes podem reduzir a utilização de energia de aquecimento em comparação com coberturas brancas e escuras; ii) em relação às coberturas brancas, nenhuma das soluções de coberturas verdes é opção para reduzir a utilização da energia de arrefecimento; iii) para edifícios antigos (níveis de isolamento inferiores) com coberturas escuras e limitações estruturais, as coberturas verdes extensivas podem ser uma solução para reduzir o consumo de energia. Relativamente à alínea ii), o autor afirma que apesar dos efeitos de arrefecimento das coberturas verdes, uma cobertura altamente reflexiva (cobertura branca) é mais eficaz no desempenho energético,

Resumindo, segundo o autor, as coberturas de tipologia extensiva apenas revelaram ser um benefício para a redução dos consumos energéticos relativamente a coberturas escuras e não isoladas termicamente, sugerindo ser uma solução para reabilitação de edifícios antigos.

Tabela 4.5 - Consumos energéticos na fase de utilização do edifício (Nic e Nvc) das 2 soluções comparadas.

Dados:	U - Coeficiente de transmissão térmica (W/m ² .°C) = 0,36507169 GD (LISBOA I1 1190 5,3 V2 32 11) = 1190
Nic INVERNO	
-43,7%	10,4264 KWh/m ² .ano cobertura branca 5,8701 KWh/m ² .ano cobertura verde
Nvc VERAO	
74,1%	20,2396 KWh/m ² .ano cobertura branca 35,2371 KWh/m ² .ano cobertura verde
consumo total	
<i>anual</i>	30,6660 KWh/m ² .ano cobertura branca
<i>anual</i>	41,1072 KWh/m ² .ano cobertura verde
90 anos	2 759,9420 KWh/m ² cobertura branca
90 anos	3 699,6470 KWh/m ² cobertura verde

Nic e Nvc; necessidades nominais de aquecimento e arrefecimento.

Os resultados anteriores revelam claramente que a energia operacional na fase de utilização apresenta valores muito mais elevados do que todos os outros processos, sendo o *output Electricity [Electric power]* equivalente a 3 700 KWh (13 318 GJ) por m² de cobertura (90 anos). Para facilitar a interpretação dos resultados gerados pelos diferentes processos de produção, um cenário adicional B foi criado, da forma que a seguir se descreve:

- Cenário A (planos *Gabi*: cobertura verde extensiva vs cobertura convencional); inclui o módulo B1 da fase de utilização - utilização do produto instalado, i.e., a energia operacional do edifício na etapa do ciclo de vida *gate to grave*.

- Cenário B (planos *Gabi*: cobertura verde extensiva1 vs cobertura convencional1); não inclui o módulo B1 da fase de utilização - utilização do produto instalado.

De notar que a presente ACV adota a metodologia e modularidade da EN 15804. Por questões de simplificação metodológica, não inclui os módulos B2, B3, B4 e C1 e agrupa as etapas UPSTREAM e CORE numa única *cradle to gate* UPSTREAM_CORE (*product stage* - desde a extracção à produção).

i. Cenário A (inclui o módulo B1 da fase de utilização)

A Tabela 4.6 apresenta os resultados da Análise Energética do Ciclo de Vida (LCEA) comparativa. Observa-se que a cobertura verde extensiva consome mais recursos energéticos - mais 33% do que a cobertura convencional de referência. Observando numa perspectiva temporal da contribuição das etapas do ciclo de vida para os resultados desta ACV, constata-se que a etapa do ciclo de vida DOWNSTREAM (*gate to grave*) revela valores de recursos energéticos substancialmente superiores aos da etapa UPSTREAM_CORE (*cradle to gate*). O que é expectável, devido ao efeito cumulativo da energia operacional durante o tempo de vida útil (90 anos) da componente do edifício avaliada (Figuras 4.1 e 4.2).

Tabela 4.6 – Recursos energéticos (MJ): comparação entre coberturas extensiva e convencional (cenário A).

Energy (gross calorific value) MJ	Cobertura verde extensiva			Cobertura convencional			Diferença			Diferença %		
	TOTAL	UPSTREAM_C ORE	DOWNSTREAM	TOTAL	UPSTREAM_C ORE	DOWNSTREAM	TOTAL	UPSTREAM_ CORE	DOWNSTREAM	TOTAL	UPSTREAM_ CORE	DOWNSTREAM
Energy resources	37 555,54	838,91	36 716,63	28 136,02	750,94	27 385,08	9 419,52	87,97	9 331,55	33%	12%	34%
Non renewable energy resources	23 266,64	716,35	22 550,28	17 533,46	716,35	16 817,10	5 733,18	0,00	5 733,18	33%	0%	34%
Renewable energy resources	14 185,56	19,21	14 166,35	10 587,18	19,21	10 567,97	3 598,37	0,00	3 598,37	34%	0%	34%
Energy embodied EE	103,35	0,00	103,35	15,38	15,38	0,00	87,97	-15,38	103,35			

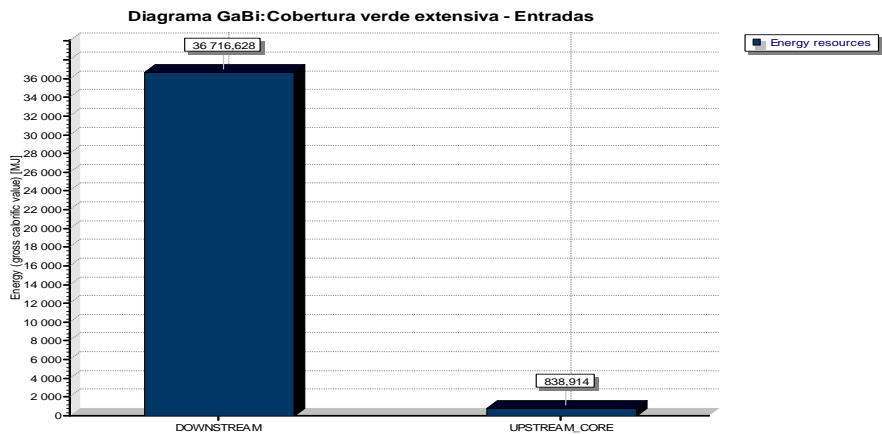


Figura 4.1 - Recursos energéticos no ciclo de vida da cobertura verde extensiva extensiva (PE Int'l, GaBi. 2014).

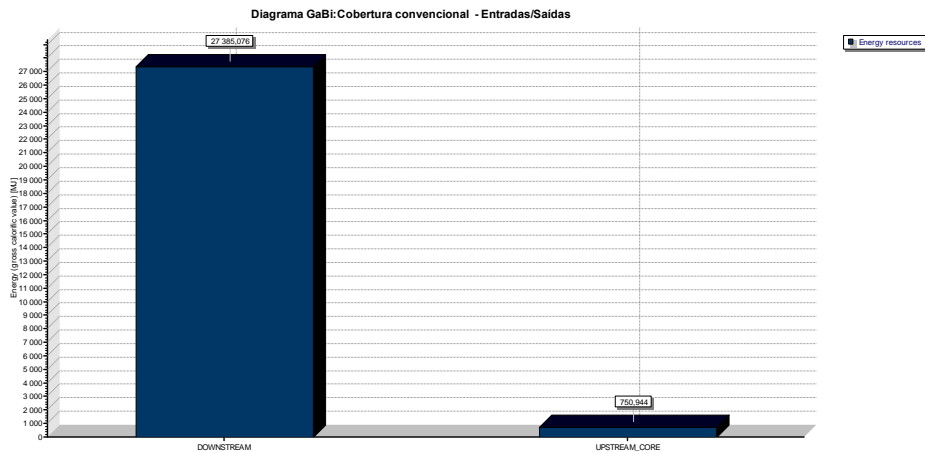


Figura 4.2 - Recursos energéticos no ciclo de vida da cobertura convencional (PE Int'l, GaBi. 2014).

ii. **Cenário B** (não inclui o módulo B1 da fase de utilização)

A Tabela 4.7 revela os resultados da LCEA comparativa do cenário B. Observa-se que a cobertura verde extensiva consome mais recursos energéticos - mais 15% do que a cobertura convencional de referência, mas com um valor 18% inferior ao resultado do cenário A. Tal deve-se a um fator: a diferença entre o processo *1a Seixo rolado (proteção pesada)* da cobertura convencional de referência (EE = 0,083 MJ/kg; Material Profile: Aggregate; General Aggregate) e o processo *Substrato de crescimento: PT* da cobertura verde extensiva (EE = 0,45 MJ/kg; Material Profile: Soil; General (Rammed) Soil) (ICE, 2011) (Tabela 8).

Tabela 4.7 – Recursos energéticos (MJ): comparação entre coberturas extensiva e convencional (cenário B).

Energy (gross calorific value) MJ	Cobertura verde extensiva 1			Cobertura convencional 1			Diferença			Diferença %		
	TOTAL	UPSTREAM_CORE	DOWNSTREAM	TOTAL	UPSTREAM_CORE	DOWNSTREAM	TOTAL	UPSTREAM_CORE	DOWNSTREAM	TOTAL	UPSTREAM_CORE	DOWNSTREAM
Energy resources	944,36	838,91	105,45	823,45	750,94	72,51	120,91	87,97	32,94	15%	12%	45%
Non renewable energy resources	815,44	716,35	99,09	784,48	716,35	68,13	30,96	0,00	30,96	4%	0%	45%
Renewable energy resources	25,57	19,21	6,36	23,59	19,21	4,38	1,98	0,00	1,98	8%	0%	45%
Energy embodied EE	103,35	103,35	0,00	15,38	15,38	0,00	87,97	87,97	0,00			

No que respeita à contribuição das etapas do ciclo de vida para os resultados, constata-se que, inversamente ao cenário A, a etapa do ciclo de vida DOWNSTREAM (*gate to grave*) revela valores de recursos energéticos substancialmente inferiores à etapa UPSTREAM_CORE (*cradle to gate*) (Figuras 4.3 e 4.4), visto que este cenário B não inclui o módulo B1 da fase de utilização.

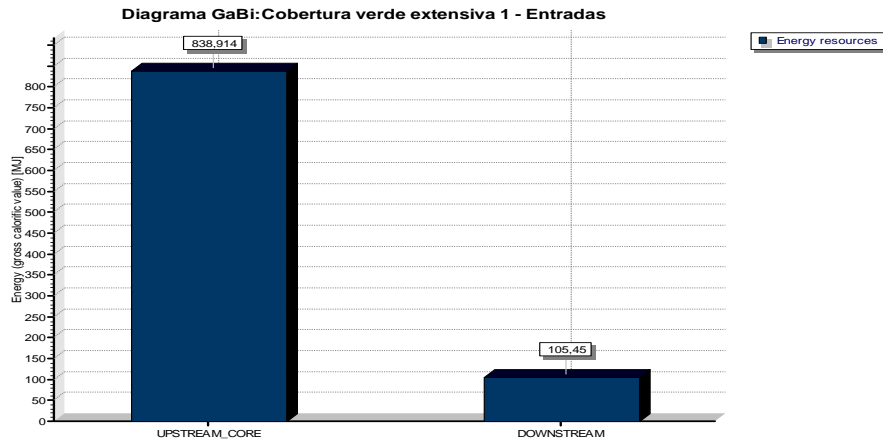


Figura 4.3 - Recursos energéticos no ciclo de vida da cobertura verde extensiva (cenário B) (PE Int'l, GaBi. 2014).

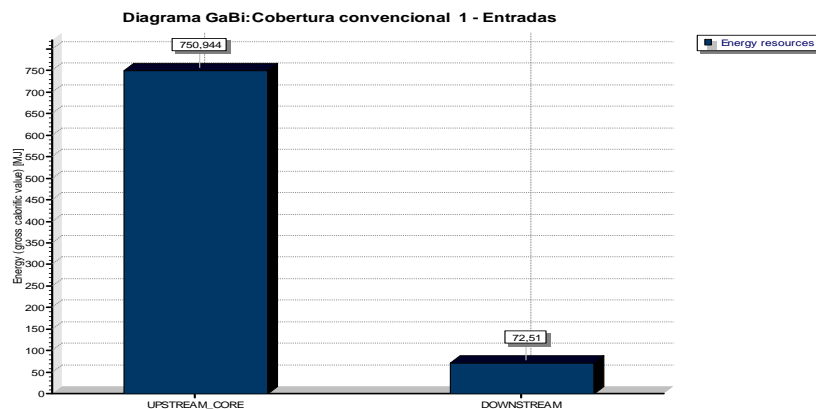


Figura 4.4 - Recursos energéticos no ciclo de vida da cobertura convencional (cenário B) (PE Int'l, GaBi. 2014).

iii. Comparação cumulativa da energia operacional e da energia incorporada (cenário A)

A energia Incorporada pode ser definida como a energia consumida por todos os processos associados à produção de um edifício, desde a extração e processamento de recursos naturais até ao fabrico, transporte e entrega do produto. A energia incorporada (EE: Embodied Energy) não inclui a operação e eliminação do material de construção, que devem ser consideradas numa abordagem de ciclo de vida. A energia incorporada é o componente a montante (*upstream*) do impacto do ciclo de vida de uma habitação.

Cada edifício é uma combinação complexa de muitos materiais processados, contribuindo individualmente para a energia incorporada total. A reabilitação e a manutenção também adicionam energia incorporada ao longo da vida de um edifício. Por isso, as escolhas de materiais e processos de construção pode mudar significativamente a quantidade de energia incorporada num edifício, visto que o conteúdo energia incorporada é muito variável entre produtos e materiais.

Na Tabela 4.8 são apresentados os coeficientes de energia e carbono incorporados da *Inventory of Carbon & Energy* (ICE, 2011) relativos aos processos criados na presente ACV. Na coluna (valores adotados), são verificados os processos *Gabi* em que a base de dados ICE foi utilizada para fornecer *inputs*.

Tabela 4.8 - Embodied Energy & Carbon Coefficients, Inventory of Carbon & Energy (ICE, 2011).

Processos/Planos	EE - MJ/kg (Energia incorporada)	EC - kgCO ₂ e/kg (Carbono Incorporado)	Valores adotados
1 Camada vegetal: PT			
1a Seixo rolado (proteção pesada)	0,083	0,0052	X
2 Substrato de crescimento: PT			
3 Manta geotêxtil de fibras sintéticas - Polypropylene fibers (PP) PE :EU-27	99,2	3,43	
4 Lâmina granular de polietileno de alta densidade - Polyethylene high density granulate (PE-HD) ELCD/PlasticsEurope <p-agg> :RER	76,7	1,93	
5 Placas de poliestireno extrudido - General purpose polystyrene (GPPS) PlasticsEurope :EU-27	86,4	3,43	
6 Membrana de impermeabilização bicapa (Membrana de impermeabilização de betume polímero APP)			parcialmente
Polypropylene granulate (PP)1 [6 Membrana de impermeabilização]	115,1	4,49	
Bitumen at refinery1 [6 Membrana de impermeabilização]	51	0,45	
Cargas minerais de carbonato de cálcio [6 Membrana de impermeabilização]	1,5	0,09	X
7 Emulsão betuminosa - Bitumen at refinery PE :EU-27	51	0,45	
8 Betão leve de argila expandida - Lightweight concrete block PE: EU-27	3,5	0,3	
Cobertura convencional DOWNSTREAM:PT			
Cobertura verde extensiva DOWNSTREAM :PT			
Electricity grid mix1 PE: PT / Electricity grid mix2 PE: PT			

[*] Inventory of Carbon & Energy (ICE) Version 2.0 Prof. Geoff Hammond & Craig Jones
Sustainable Energy Research Team (SERT) Department of Mechanical Engineering University of
Bath, UK This project was joint funded under the Carbon Vision Buildings program by:
www.bath.ac.uk/mech-eng/ser/embodied

Com base na tabela anterior e na Figura 4.5 pode distinguir-se dois intervalos de valores para os coeficientes de EE (Embodied Energy) (ICE, 2011):

- $EE \geq 50$ MJ/kg
 - Polypropylene granulate (PP)1 [6 Membrana de impermeabilização];
 - 3 Manta geotêxtil de fibras sintéticas - Polypropylene fibers (PP) PE :EU-27;
 - 5 Placas de poliestireno extrudido - General purpose polystyrene (GPPS) PlasticsEurope :EU-27;
 - 4 Lâmina granular de polietileno de alta densidade - Polyethylene high density granulate (PE-HD) ELCD/PlasticsEurope RER;
 - 7 Emulsão betuminosa - Bitumen at refinery PE :EU-27.
- $EE \leq 50$ MJ/kg
 - 8 Betão leve de argila expandida - Lightweight concrete block PE: EU-27;

- Cargas minerais de carbonato de cálcio [6 Membrana de impermeabilização];
- 2 Substrato de crescimento: PT;
- 1a Seixo rolado (proteção pesada).

O primeiro grupo abarca valores mais elevados de coeficientes de EE incluindo materiais plásticos, com excepção do betume, um produto intermédio orgânico (*organic intermediate product*) (Tabela 4.9). O segundo grupo inclui materiais com energias incorporadas inferiores a 50 MJ/kg.

A maioria dos polímeros tem um comportamento plástico, amolecendo com o aumento da temperatura. Os plásticos são materiais que têm como elemento principal um polímero sintético (em geral são uma mistura de polímeros com cargas, estabilizadores, plastificantes, etc.). São materiais orgânicos com uma composição química baseada no carbono, tendo como matéria-prima hidrocarbonetos (carbono e hidrogénio), a fracção mais leve da destilação do petróleo que segue para as petroquímicas onde se obtêm os monómeros.

O betume é uma substância viscosa frequentemente utilizada em pavimentação de estradas ou em impermeabilizações. O betume pode ser natural (*crude bitumen*) ou sintético (refinado). O betume refinado é a fracção residual obtida da destilação fraccional do petróleo. O betume de ocorrência natural é o principal *feedstock* para produção de petróleo a partir de areias betuminosas (*tar sands*) – as maiores reservas conhecidas existem no Canadá (ICE, 2011).

Tabela 4.9 – Arvore de fluxos: *valuable substances – materials* (PE Int'l, GaBi. 2014).

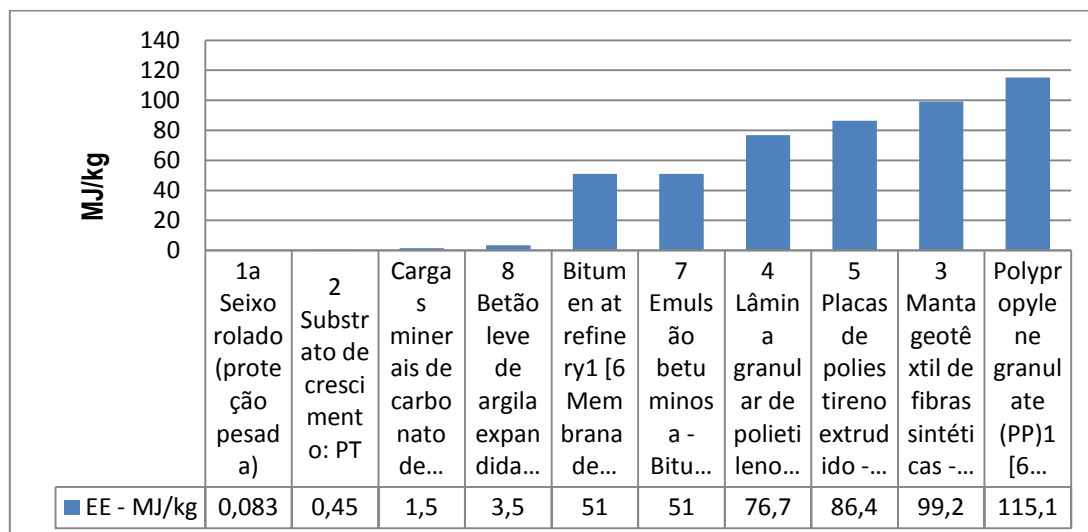
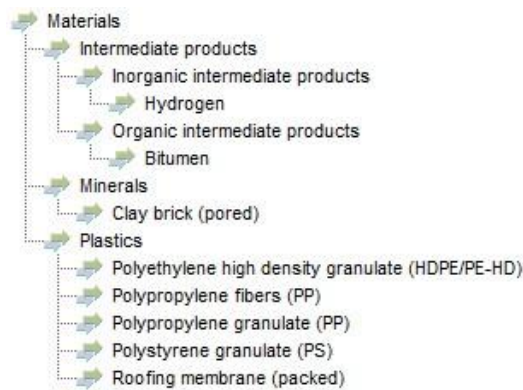


Figura 4.5 - EE (Energia Incorporada) das camadas funcionais (processos GaBi) que formam o sistema construtivo das coberturas.. Embodied Energy & Carbon Coefficients, Inventory of Carbon & Energy (ICE, 2011).

De seguida, interessa abordar alguns aspectos relacionados com a energia incorporada e a energia operacional. Segundo Milne & Reardon (2013), até hoje pensava-se que o teor de energia incorporada de um edifício era reduzido quando comparado com a energia utilizada na operação do edifício durante a sua vida útil. Portanto, um maior esforço tem sido

colocado na redução de energia operacional, através da melhoria da eficiência energética da envolvente do edifício. Segundo os autores, a pesquisa mostrou que nem sempre é assim. A energia incorporada pode ser equivalente a muitos anos de energia operacional. O consumo de energia operacional depende dos ocupantes, enquanto que a energia incorporada não é dependente do utilizador - é construída dentro dos materiais. O conteúdo de energia incorporada ocorre apenas uma vez (para além da manutenção e renovação), enquanto que a energia operacional se acumula ao longo do tempo e pode ser influenciada em todo o ciclo de vida dum edifício.

No que concerne á “comparação cumulativa da energia operacional e da energia incorporada” realizada nesta ACV, observa-se o seguinte (Figuras 4.6 e 4.7):

Assumindo uma taxa de crescimento média constante ao longo do tempo de vida útil do edifício de 9 décadas, a energia operacional acumula-se desde OE=1,479 GJ/kg.m2 até OE=13,318 GJ/Kg.m2. Como seria expectável, a energia incorporada (EE) das coberturas em análise tem uma taxa de crescimento muito inferior à energia operacional (OE), visto que não depende do utilizador, nem é influenciável ao longo do longo ciclo de vida, exceto em ações de manutenção e reabilitação. Considerando estas aproximações, pode-se afirmar que a energia operacional iguala e ultrapassa a energia incorporada durante os primeiros 10 anos de utilização (EE=OE= 838 MJ/kg.m2 de cobertura verde extensiva; EE=OE= 751 MJ/kg.m2 de cobertura convencional).

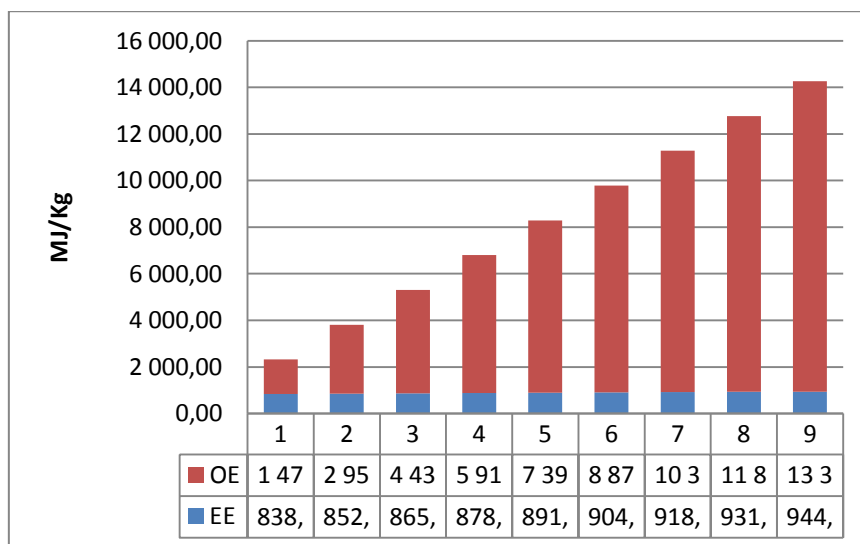


Figura 4.6 - Comparação cumulativa da energia operacional e da energia incorporada - cobertura verde extensiva.

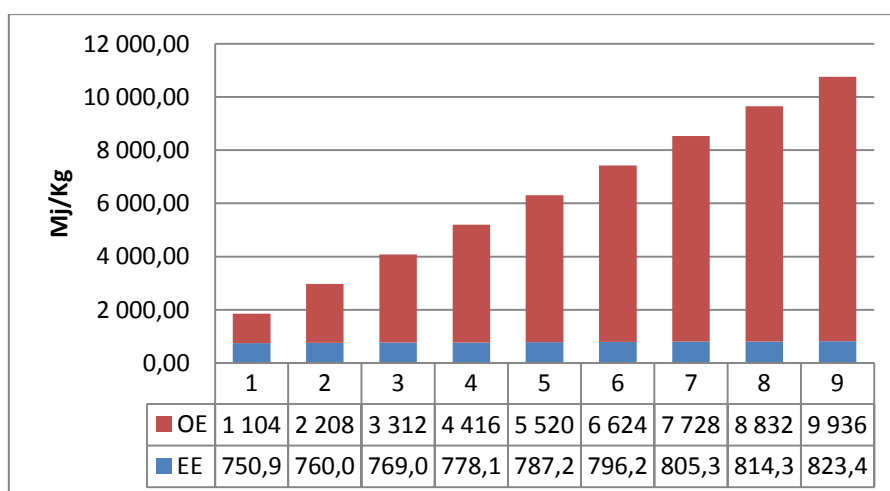


Figura 4.7 - Comparação cumulativa da energia operacional e da energia incorporada - cobertura convencional.

Pode-se acrescentar que o conteúdo de energia incorporada é muito variável com as diferentes tipologias de construção. De acordo com Milne & Reardon (2013), em muitos casos, um maior nível de energia incorporada justifica-se se contribui para reduzir a energia operacional. Por exemplo, grandes quantidades de massa térmica, alta em energia incorporada, podem reduzir significativamente as necessidades de aquecimento e arrefecimento de edifícios solares passivos bem projetados e isolados termicamente. Como a eficiência energética das habitações e dos equipamentos tem tendência para aumentar, a energia incorporada será cada vez mais importante. Os níveis de energia incorporada dos materiais serão reduzidos se a eficiência energética das indústrias que os produzem for melhorada. No entanto, a procura demonstrada por materiais de baixa energia incorporada também é necessária

iv. Efeito indireto da redução da Ilha de Calor Urbana (ICU)

Um fator importante que interessa explicar consiste no efeito indireto da diminuição da temperatura, devido à instalação de coberturas verdes à escala urbana. De fato, uma redução da Ilha de Calor Urbana (ICU) provocaria uma diminuição das necessidades de consumo energético na fase de utilização dum edifício, fator esse que não foi contabilizado na presente análise energética do ciclo de vida (LCEA), mas que pode ser avaliado aproximadamente, calculando o produto dessas poupanças energéticas por m² pela área de implantação das coberturas verdes na cidade de Lisboa.

Saiz et al. (2006) citam estudos realizados em Toronto (Canadá) que sugerem que uma diminuição de 1° C na temperatura seria obtida num terço da cidade, se 50 % dos edifícios tivessem coberturas verdes e, pelo menos, 3 % estivessem totalmente saturadas. Também Akbari et al. (2005), citados por Getter et al. (2006), salientam que uma redução adicional de 25% no consumo de electricidade poderá ocorrer devido à redução indireta da Ilha de Calor Urbana (ICU) obtida a partir da implementação de grande escala de coberturas verdes ao longo de uma área urbana.

v. Propriedades das camadas funcionais

No que respeita ao peso das camadas funcionais (Figura 4.8) que formam o sistema construtivo das coberturas comparadas, observa-se que as 4 seguintes (por ordem decrescente) são as que apresentam valores mais significativos, com potencial para um aumento indesejável das cargas permanentes actuantes na estrutura resistente da cobertura e consequente aumento dos impactes ambientais, como é o caso particular da camada funcional “8 Betão leve de argila expandida”, apesar de apresentar um coeficiente menor que os plásticos. (EE = 3,5 MJ/kg; EC = 0,3 kgCO₂e/kg).

- 2 Substrato de crescimento: PT;
- 1a Seixo rolado (proteção pesada);
- 8 Betão leve de argila expandida - *Lightweight concrete block PE: EU-27*;
- 1 Camada vegetal: PT

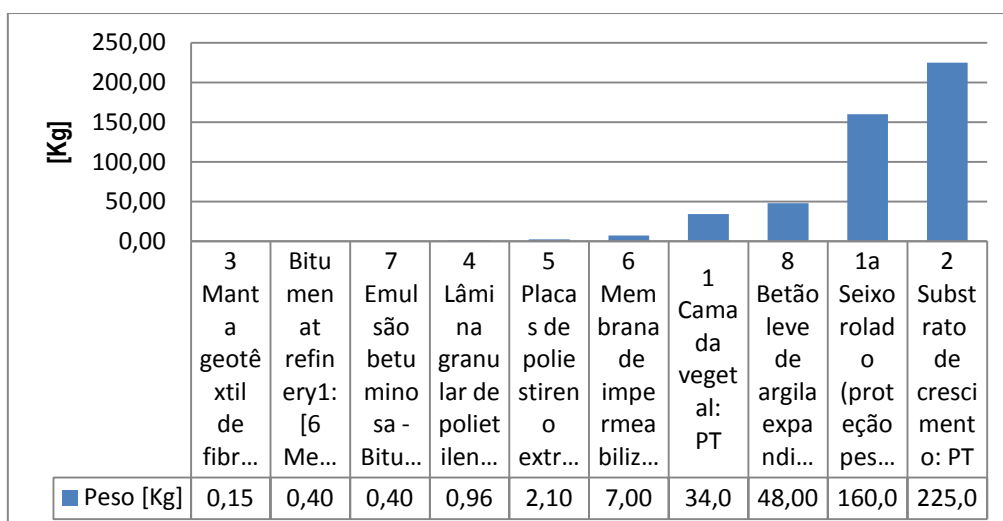


Figura 4.8 - Peso (Kg) das camadas funcionais (processos GaBi) que formam o sistema construtivo das coberturas.

No que respeita à condutibilidade térmica λ (W/m°C) das camadas funcionais que formam o sistema construtivo das coberturas comparadas observa-se que 3 delas (por ordem crescente) apresentam valores mais significativos com potencial para isolamento térmico, pertencendo ao intervalo $\lambda \leq 0,1$ W/m°C (Figura 4.9) (Pina dos Santos & Matias, 2006), :

- 7 Emulsão betuminosa - *Bitumen at refinery PE :EU-27*;
- 5 Placas de poliestireno extrudido - *General purpose polystyrene (GPPS) PlasticsEurope :EU-27*;
- 3 Manta geotêxtil de fibras sintéticas - *Polypropylene fibers (PP) PE :EU-27*.

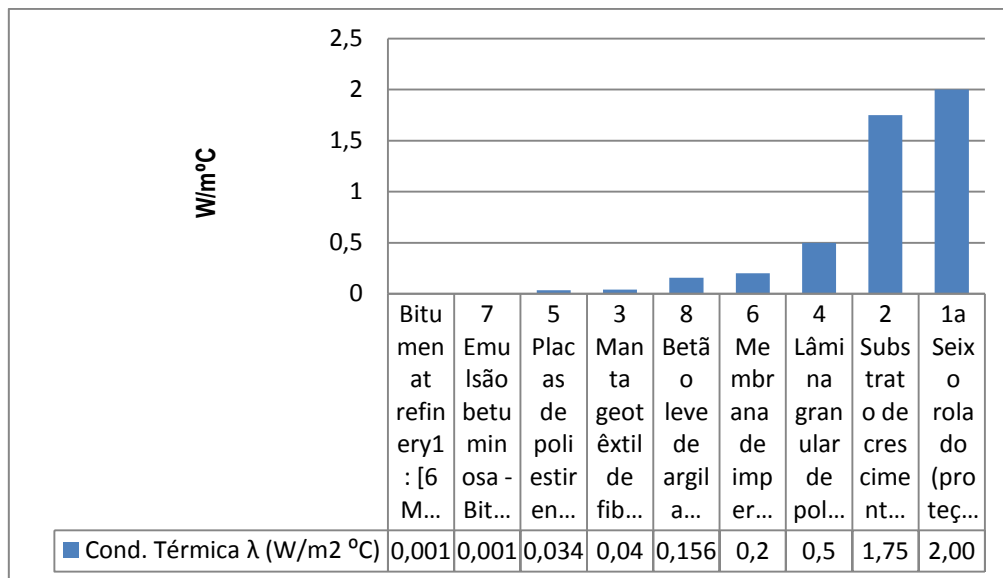


Figura 4.9 - Condutibilidade térmica λ (W/m°C) das camadas funcionais (processos Gabi) que formam o sistema construtivo das coberturas.

No que respeita à resistência térmica ($R = \text{espessura} / \lambda$; m² °C/W) das camadas funcionais que formam o sistema construtivo das coberturas comparadas observa-se que duas delas (por ordem decrescente) apresentam valores mais significativos, com uma contribuição representativa para o coeficiente de isolamento térmico da componente do edifício, situada no no intervalo $R \geq 0,5$ W/m°C (Figura 4.10) :

- 5 Placas de poliestireno extrudido - *General purpose polystyrene (GPPS) PlasticsEurope :EU-27*;
- 8 Betão leve de argila expandida - *Lightweight concrete block PE: EU-27*.
-

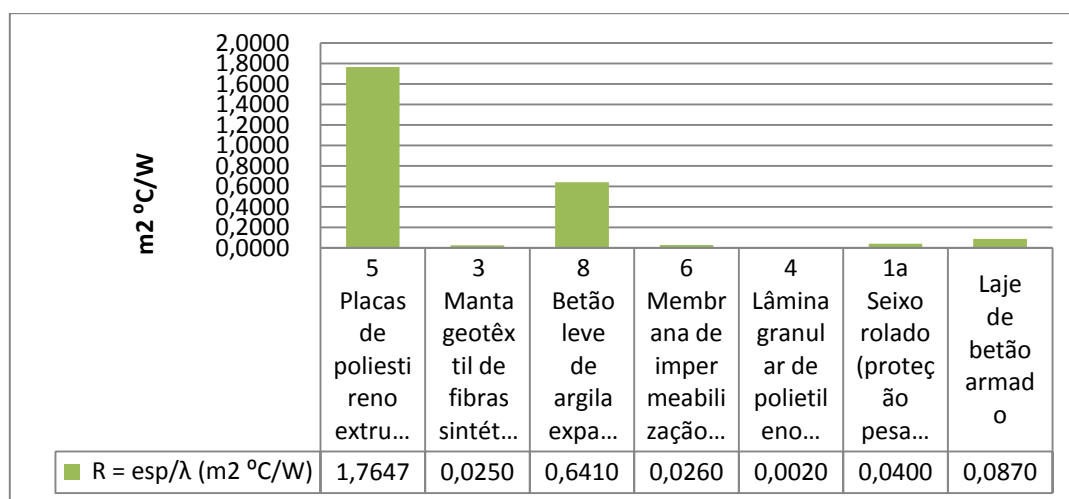


Figura 4.10 - Resistência térmica $R = \text{esp}/\lambda$ (m² °C/W) das camadas funcionais.

4.1.2. Indicadores das categorias de impacte

Com base na Tabela 4.8 anterior, foi elaborado o gráfico da Figura 4.11, podendo assim distinguir-se dois intervalos de valores para os coeficientes de carbono Incorporado (EC: Embodied Carbon) das camadas funcionais que formam o sistema construtivo das coberturas avaliadas (ICE, 2011):

- $EC \geq 1 \text{ kgCO}_2\text{e/kg}$
 - Polypropylene granulate (PP)1 [6 Membrana de impermeabilização];
 - 3 Manta geotêxtil de fibras sintéticas - Polypropylene fibers (PP) PE :EU-27;
 - 5 Placas de poliestireno extrudido - General purpose polystyrene (GPPS) PlasticsEurope :EU-27;
 - 4 Lâmina granular de polietileno de alta densidade - Polyethylene high density granulate (PE-HD) ELCD/PlasticsEurope <p-agg> :RER.
- $EC \leq 1 \text{ kgCO}_2\text{e/kg}$
 - 7 Emulsão betuminosa - Bitumen at refinery PE :EU-27;
 - 8 Betão leve de argila expandida - Lightweight concrete block PE: EU-27;
 - Cargas minerais de carbonato de cálcio [6 Membrana de impermeabilização];
 - 2 Substrato de crescimento: PT;
 - 1a Seixo rolado (proteção pesada).

Observa-se semelhança (na ordenação) com os dois intervalos de valores observados anteriormente para os coeficientes de EE (Tabela 9). Também o primeiro grupo de valores mais elevados de EC inclui materiais plásticos (com exceção do betume). No entanto, de notar que, no caso particular da camada funcional “8 Betão leve de argila expandida”, apesar desta apresentar coeficientes relativamente reduzidos. (EE = 3,5 MJ/kg; EC = 0,3 kgCO₂e/kg). tem (inversamente) uma contribuição alta da sua massa - 48 Kg por unidade funcional de m² de cobertura) - o que implica maiores impactes ambientais

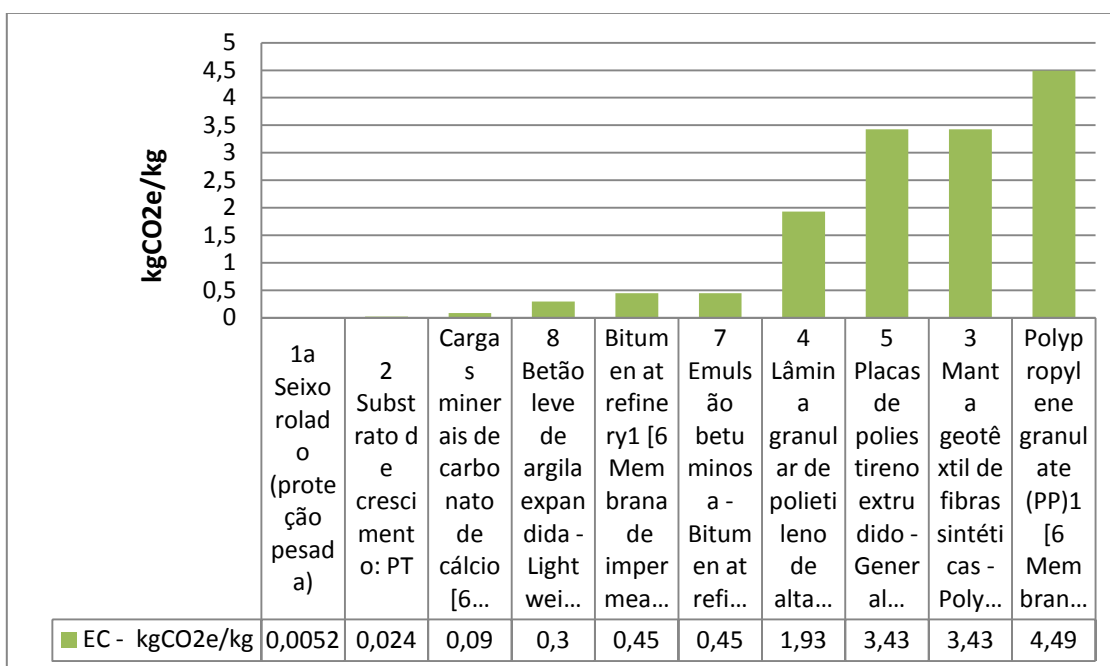


Figura 4.11- EC (Carbono Incorporado) das camadas funcionais (processos GaBi) que formam o sistema construtivo das coberturas..Embodied Energy & Carbon Coefficients, Inventory of Carbon & Energy (ICE, 2011).

Como foi anteriormente referido, a energia operacional na fase de utilização apresenta valores muito mais elevados relativamente a todos os outros processos da ACV, constituindo assim um *contributor* de elevado peso, mas muito dependente de fator “utilizador”, ou seja, muito influenciável pelas escolhas dos utentes ao longo do ciclo de vida *gate to grave*. Por isso, para facilitar a análise comparativa desses processos foram criados 2 diferentes cenários Gabi,: i) cenário A (cobertura verde extensiva / cobertura convencional); estes planos Gabi incluem a energia operacional do edifício, correspondente à etapa do ciclo de vida *gate to grave (downstream)*; ii) cenário B (cobertura verde extensiva1 / cobertura convencional1); estes planos Gabi não foi incluem a energia operacional do edifício.

4.1.2.1. Cenário A

CML 2001 Characterization factors: version 3.9 (November 2010) é o método de Avaliação de Impacte Ambiental (LCIA) utilizado na presente avaliação do ciclo de vida, A descrição detalhada das categorias de impacte ambiental selecionadas na presente ACV é feita no “Suplemento A - Descrição de resultados e de categorias de impacte” do documento disponível

online GaBi Database & Modelling Principles 2014 (PE Int'l, GaBi, 2014). Nesse suplemento são descritas as metodologias de avaliação de impacto disponíveis no software GaBi após a atualização de 2013. De notar que o sequestro de carbono da coberturas verde extensiva é considerado neste cenário A.

Da análise comparativa das coberturas "verde extensiva" vs "convencional" pode-se observar os dois indicadores de categoria de impacto que apresentam diferenças significativas (Tabela 4.10 e Figura 4.12). Verifica-se que as diferenças encontradas são muito mais acentuadas na etapa do ciclo de vida *gate to grave* (*downstream*), em favor da solução de referência "convencional" (menores impactes):

- CML2001 - Nov. 2010, Abiotic Depletion (ADP fossil) [MJ];
- CML2001 - Nov. 2010, Global Warming Potential (GWP 100 years) [kg CO2-Equiv.]

Tabela 4.10 - Comparação "verde extensiva" vs "convencional" (cenário A)

	Cobertura verde extensiva			Cobertura convencional			Comparação		
	TOTAL	UPSTREAM	CORE DOWNSTREAM	TOTAL	UPSTREAM	CORE DOWNSTREAM	TOTAL	UPSTREAM	CORE DOWNSTREAM
CML2001 - Nov. 2010, Abiotic Depletion (ADP elements) [kg Sb-Equiv.]	0,000313	0,000021	0,000292	0,000237	0,000021	0,000216	0,00	0,00	0,00
CML2001 - Nov. 2010, Abiotic Depletion (ADP fossil) [MJ]	20 580,68	645,80	19 934,88	15512,16	645,80	14866,35	5068,52	0,00	5068,52
CML2001 - Nov. 2010, Acidification Potential (AP) [kg SO2-Equiv.]	9,160482	0,101200	9,059282	6,86	0,10	6,76	2,30	0,00	2,30
CML2001 - Nov. 2010, Eutrophication Potential (EP) [kg Phosphate-Equiv.]	0,702832	0,007500	0,695332	0,52	0,01	0,52	0,18	0,00	0,18
CML2001 - Nov. 2010, Global Warming Potential (GWP 100 years) [kg CO2-Equiv.]	1 619,46	30,73	1 588,73	1223,23	26,17	1197,07	396,23	4,57	391,66
CML2001 - Nov. 2010, Ozone Layer Depletion Potential (ODP, steady state)	0,000450	0,000000	0,000450	0,000310	0,000000	0,00	0,00	0,00	0,00
CML2001 - Nov. 2010, Photochem. Ozone Creation Potential (POCP) [kg E]	0,748631	0,009173	0,739459	0,561718	0,009173	0,55	0,19	0,00	0,19

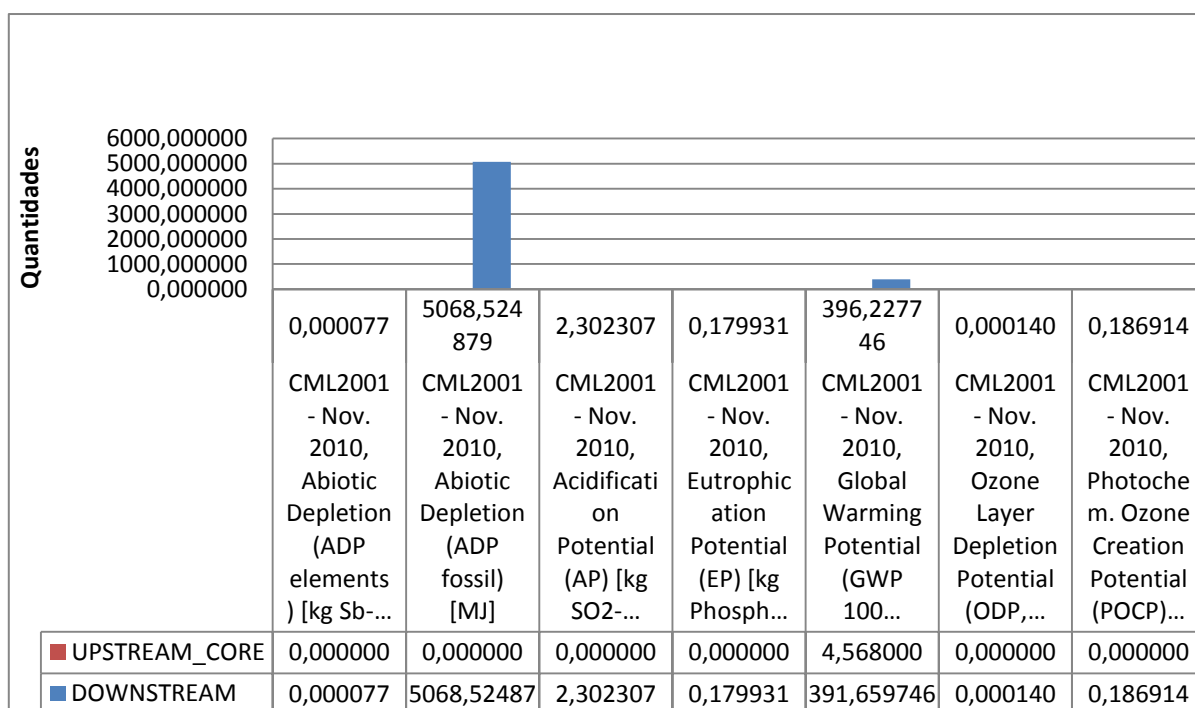


Figura 4.12 - Comparação "verde extensiva" vs "convencional" (cenário A).

Estes resultados devem-se ao "peso" substancial do consumo de energia térmica da componente do edifício durante a fase de utilização, o qual foi modelado em detalhe no processo *Electricity grid mix PE: PT*.

4.1.2.2. Cenário B

Pelas razões já apontadas, no cenário B (cobertura verde extensiva1 / cobertura convencional1) não foi incluída energia operacional do edifício, correspondente à etapa do ciclo de vida *gate to grave* (*downstream*). Da análise comparativa "verde extensiva" vs "convencional" pode-se observar os dois indicadores de categoria de impacto que apresentam diferenças significativas (Tabela 4.11 e Figura 4.13):

- CML2001 - Nov. 2010, Abiotic Depletion (ADP fossil) [MJ]: A diferença "verde extensiva" vs "convencional" apresenta um valor positivo significativo, o que significa que a cobertura "verde extensiva" tem um impacto maior relativo, em termos de *ADP fossil*, localizado temporalmente na etapa do ciclo de vida *gate to grave* (*downstream*).
- CML2001 - Nov. 2010, Global Warming Potential (GWP 100 years) [kg CO2-Equiv.]: A diferença "verde extensiva" vs "convencional" apresenta um valor negativo significativo, o que significa que a cobertura "verde extensiva" tem um impacto menor relativo, em termos de *GWP 100 years*, localizado parcialmente na etapa do ciclo de vida

DOWNSTREAM. Estas quantidades de indicador *GWP 100 years* explicam-se pelo *input* (fluxo de CO₂) no processo *Cobertura verde extensiva DOWNSTREAM :PT*, produzido pela da camada funcional vegetal e equivalente à captura de dióxido carbono. Este *contributor* será analisado de seguida em i) Sequestro de carbono de coberturas verdes extensivas.

Tabela 4.11 - Comparação "verde extensiva" vs "convencional" (cenário B).

	Cobertura verde extensiva1			Cobertura convencional1			Comparação		
	TOTAL	UPSTREAM_CORE	DOWNSTREAM	TOTAL	UPSTREAM_CORE	DOWNSTREAM	TOTAL	UPSTREAM_CORE	DOWNSTREAM
CML2001 - Nov. 2010, Abiotic Depletion (ADP elements) [kg Sb-Equiv.]	0,00005	0,00002	0,00003	0,00004	0,00002	0,00002	0,00001	0,00000	0,00001
CML2001 - Nov. 2010, Abiotic Depletion (ADP fossil) [MJ]	738,30	645,80	92,50	709,40	645,80	63,60	28,90	0,00	28,90
CML2001 - Nov. 2010, Acidification Potential (AP) [kg SO ₂ -Equiv.]	0,12520	0,10120	0,02400	0,11770	0,10120	0,01650	0,00750	0,00000	0,00750
CML2001 - Nov. 2010, Eutrophication Potential (EP) [kg Phosphate-Equiv.]	0,06432	0,00750	0,05682	0,04656	0,00750	0,03906	0,01776	0,00000	0,01776
CML2001 - Nov. 2010, Global Warming Potential (GWP 100 years) [kg CO ₂ e]	26,55	30,73	-4,19	34,89	26,17	8,73	-8,35	4,57	-12,91
CML2001 - Nov. 2010, Ozone Layer Depletion Potential (ODP, steady state)	0,00045	0,00000	0,00045	0,00031	0,00000	0,00031	0,00014	0,00000	0,00014
CML2001 - Nov. 2010, Photochem. Ozone Creation Potential (POCP) [kg E]	0,01388	0,00917	0,00471	0,01358	0,00917	0,00441	0,00030	0,00000	0,00030

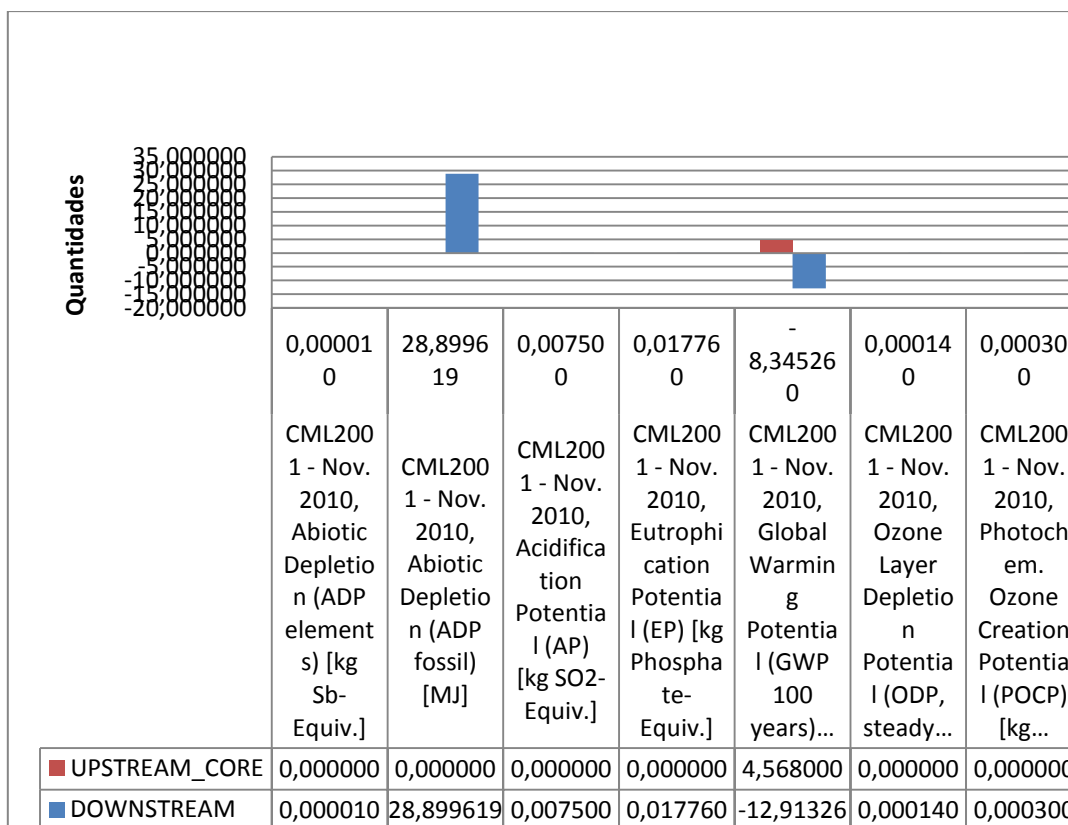


Figura 4.13 - Comparação "verde extensiva" vs "convencional" (cenário B).

i. Sequestro de carbono de coberturas verdes extensivas.

As coberturas verdes também podem sequestrar carbono nas plantas e solos constituintes das suas camadas funcionais de topo (1 Camada vegetal ; 2 Substrato de crescimento). A fotossíntese remove CO₂ da atmosfera e armazena carbono na biomassa das plantas - um processo normalmente referido como sequestro de carbono terrestre, sendo o carbono transferido para o substrato de crescimento. Segundo Getter et al. (2006), o período de tempo que este carbono permanece no solo antes da decomposição ainda não foi quantificado para as coberturas verdes, mas os autores referem que se a "produção primária líquida" superar a decomposição, este ecossistema "sintético" será um sumidouro (sink) líquido de carbono, pelo menos a curto prazo.

Muitas espécies utilizadas em coberturas verdes apresentam alguma forma de "Metabolismo do Ácido Crassuláceo" (CAM : *Crassulacean Acid Metabolism*) (Getter et al, 2006)). A fotossíntese CAM opera abrindo a *stomata* durante a noite para absorção e armazenamento de CO₂ sob a forma de um ácido orgânico nos vacúolos das células. Durante o período seguinte de luz diurna, a *stomata* permanece fechada enquanto ácido orgânico armazenado é descarboxilado em CO₂ como fonte para o ciclo normal fotossintético de redução de carbono (Cushman, 2001). Quando operam no modo CAM, as taxas de assimilação diária de carbono são de 1/2 a 1/3 das espécies *non-CAM* (Hopkins et al, 2004).

O processo *Gabi* designado de *Cobertura verde extensiva DOWNSTREAM :PT* foi localizado temporalmente na etapa do ciclo de vida *gate to grave (downstream)*. Tendo em conta as considerações anteriores, assumiu-se que, durante esse período de 90 anos, a camada funcional vegetal produziria um fluxo de *input* no processo, equivalente à captura de dióxido de carbono (sequestro de carbono): *Carbon dioxide [Renewable resources]* (PE Int'l, GaBi. 2014) (Massa = 16,875 Kg; 1 Camada vegetal: 12 375 Kg ; 2 Substrato de crescimento: 4 500 Kg).

Os valores deste fluxo foram obtidos através da revisão de literatura realizada na presente dissertação. Getter et al. (2009) realizaram dois estudos com o objetivo de quantificar o potencial de armazenamento de carbono de coberturas verdes extensivas e o efeito da seleção de espécies na acumulação de carbono. O primeiro foi realizado em 8 coberturas localizadas em Michigan (EUA) e o segundo em 4 coberturas localizadas em Maryland (EUA). As 12 coberturas verdes eram compostas principalmente por espécies *Sedum*, tendo profundidades de substrato compreendidas entre de 2,5 a 12,7 cm. Com base nas conclusões desses estudos foi elaborada a Tabela 4.12.

Tabela 4.12 - Potencial de sequestro de carbono de coberturas verdes extensivas (adaptado de Getter et al, (2009)).

Camadas funcionais	Coberturas Verdes Extensivas (Getter, 2009)	Potencial de Sequestro de Carbono [g C·m ⁻²] (Getter, 2009)	Anos/2	Potencial de Sequestro de Carbono adotado [g C·m ⁻²] 90 anos
	<i>aboveground biomass (plant material)</i>	168	45	7 560
	<i>belowground biomass</i>	107	45	4 815
	<i>substrate organic matter.</i>	100	45	4 500
1 Camada vegetal + 2 Substrato de crescimento	<i>above- and belowground biomass</i>	375	45	16 875

A maioria dos “manuais” de ACV não contem discussões sobre balanços de carbono biogénico, nem orientações sobre como lidar com sequestro (“emissões negativas”) de dióxido de carbono (PE Int'l, GaBi. 2014). Na presente ACV, não foi realizado um balanço de carbono biogénico, mas, com base nos estudos de Getter et al. (2009), foi estimado um valor por m² de 16,875 Kg para a fixação de CO₂ durante o crescimento das plantas das coberturas verdes extensivas ao longo do etapa *downstream (gate to grave)* do seu ciclo de vida. Quanto às emissões de CO₂ da incineração ou digestão do biocombustível referentes ao processo *Gabi Cobertura verde extensiva DOWNSTREAM*, estas resultam parcialmente dos “resíduos do ciclo de vida da cobertura verde extensiva” (*production residues in life cycle*).

Interessa descrever alguns aspectos da modelação da biomassa (PE Int'l, GaBi. 2014).: O ciclo do carbono na ACV pode ser definido pelas seguintes fases: **i)** CO₂ na atmosfera; **ii)** *intake* de CO₂; **iii)** colheita de biomassa; **iv)** utilização da biomassa como combustível ou matéria-prima; **v)** combustão de CO₂ / decomposição; **vi)** *intake* de CO₂ na atmosfera. Portanto, dependendo da situação, pode-se entender “biomassa” como um certo estado em diferentes pontos do ciclo: como uma planta, como biomassa recolhida ou como um produto renovável. A definição de “recursos de biomassa” é, portanto, um tanto arbitrária e pode ser escolhida de acordo com o objetivo e âmbito.

Segundo PE Int'l, GaBi (2014), o indicador de aquecimento global (GWP) pode ser calculado incluindo ou excluindo o carbono biogénico. Incluir carbono biogénico significa contabilizar o CO₂ absorvido pelas plantas com o factor 1 kg CO₂ eq./kg. Se o carbono é mais tarde libertado como CO₂ biogénico ou metano, isso também é contabilizado (CO₂ com o factor 1 e metano com um factor de 25 kg CO₂ eq./kg). Excluir carbono biogénico significa que o CO₂ absorvido pelas plantas é excluído do cálculo. O mesmo sucederá no caso de emissão de CO₂ biogénico.

A Tabela 4.13 e a Figura 4.14 mostram a evolução do indicador *GWP 100 years* acumulado ao longo da vida útil da cobertura verde extensiva (90 anos) em termos de kg CO₂-Equiv., comparando um “Desenvolvimento Convencional” (*Conventional Development*) com o “Desenvolvimento incluindo sequestro de CO₂”. Esta análise expande a presente ACV para a inclusão de impactes (líquidos) positivos no ambiente, no sentido de demonstrar que é possível conceber edifícios que funcionem como sumidouros de carbono (*carbon sinks*) e como partes activas dos ecossistemas, tendo em consideração os seguintes aspectos: **i)** fator de escala temporal aplicável durante todas as etapas do projeto; **ii)** inclusão de novas formas de impacte ambiental (inovação tecnológica); **iii)** fator de escala espacial (aplicável a edifícios e escalas urbanas).

Observa-se assim, uma redução média de 28% do indicador *GWP 100 years*, no intervalo temporal de 9 décadas. Durante a etapa do ciclo de vida *cradle to gate* (ocorrida na 1ª década) dá-se a amortização do carbono incorporado (EC) via “sequestro de CO₂ na biomassa” (CAP: *Carbon Amortization Performance*).

Tabela 4.13 – Evolução de *CML2001 - Nov. 2010, Global Warming Potential (GWP 100 years)* acumulado ao longo da vida útil da cobertura verde extensiva (90 anos).

Verde extensiva				
CML2001 - Nov. 2010, Global Warming Potential (GWP 100 years) [kg CO ₂ -Equiv.]				
Ano*10	Conventional development	CO ₂ sequestration	[1] + [2] (*)	Diferença %
1	2 082,26	1 875,00	207,26	-90%
2	4 133,78	3 750,00	2 258,78	-45%
3	6 185,31	5 625,00	4 310,31	-30%
4	8 236,83	7 500,00	6 361,83	-23%
5	10 288,36	9 375,00	8 413,36	-18%
6	12 339,88	11 250,00	10 464,88	-15%
7	14 391,41	13 125,00	12 516,41	-13%
8	16 442,94	15 000,00	14 567,94	-11%
9	18 494,46	16 875,00	16 619,46	-10%
				-28% media

(*) Amortização de Conventional Development via CO₂ sequestration

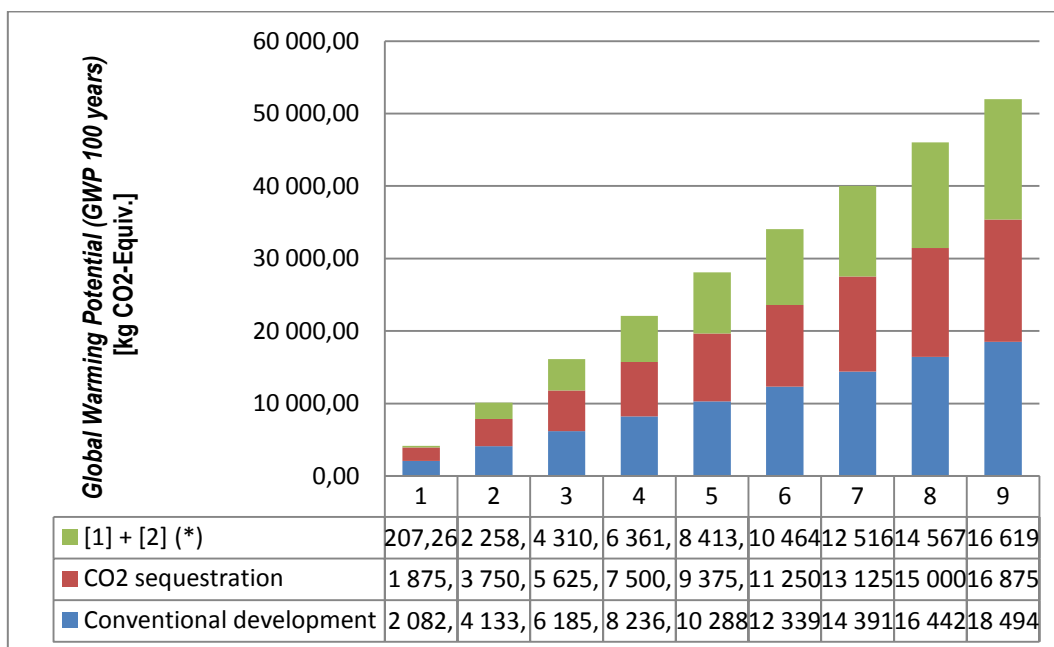


Figura 4.14 - Evolução de *CML2001 - Nov. 2010, Global Warming Potential (GWP 100 years)* acumulado ao longo da vida útil da cobertura verde extensiva (90 anos).

ii. Análise de processos

Pelas razões já enunciadas, neste cenário (B) não foi incluída a energia operacional do edifício, correspondente à etapa do ciclo de vida *gate to grave (downstream)*. Esta análise interpreta os resultados da LCIA, comparando os processos respectivos a cada camada funcional constituinte da cobertura verde extensiva. No Anexo A3 (Resultados da LCIA: Diagramas GaBi: Cobertura verde extensiva (Indicadores das categorias de impacto - Análise de processos)) são apresentadas os gráficos relativos a cada indicador. Os valores obtidos referem-se a 1 m² de unidade funcional.

a. *CML2001 - Nov. 2010, Abiotic Depletion (ADP elements) [kg Sb-Equiv.]*

Os processos que apresentam os valores mais significativos (por ordem decrescente), no que respeita à “quantidade” *ADP elements*, são os seguintes (Figura A.2.1):

- Cobertura verde extensiva1 DOWNSTREAM :PT; (3 kg Sb-Equiv)
- 8 Betão leve de argila expandida - *Lightweight concrete block PE: EU-27*;
- 5 Placas de poliestireno extrudido - *General purpose polystyrene (GPPS) PlasticsEurope :EU-27*

b. CML2001 - Nov. 2010, Abiotic Depletion (ADP fossil) [MJ]

Os processos que apresentam os valores mais significativos (por ordem decrescente), no que respeita à “quantidade” *ADP fossil*, são os seguintes (Figura A.2.2):

- 6 Membrana de impermeabilização bicapa (Membrana de impermeabilização de betume polímero APP) (274 MJ);
- 5 Placas de poliestireno extrudido - *General purpose polystyrene (GPPS) PlasticsEurope*; (157 MJ)
- 8 Betão leve de argila expandida - *Lightweight concrete block PE: EU-27*;
- Cobertura verde extensiva DOWNSTREAM :PT;
- 4 Lâmina granular de polietileno de alta densidade - *Polyethylene high density granulate (PE-HD) ELCD/PlasticsEurope RER*.

c. CML2001 - Nov. 2010, Acidification Potential (AP) [kg SO2-Equiv]

Os processos que apresentam os valores mais significativos (por ordem decrescente), no que respeita à “quantidade” *AP*, são os seguintes (Figura A.2.3):

- 8 Betão leve de argila expandida - *Lightweight concrete block PE: EU-27* (0,65 kg SO2-Equiv.);
- Cobertura verde extensiva DOWNSTREAM :PT;
- 6 Membrana de impermeabilização bicapa (Membrana de impermeabilização de betume polímero APP);
- 5 Placas de poliestireno extrudido - *General purpose polystyrene (GPPS) PlasticsEurope :EU-27*;
- 4 Lâmina granular de polietileno de alta densidade - *Polyethylene high density granulate (PE-HD) ELCD/PlasticsEurope :RER*.

d. CML2001 - Nov. 2010, Eutrophication Potential (EP) [kg Phosphate-Equiv.]

Os processos que apresentam os valores mais significativos (por ordem decrescente), no que respeita à “quantidade” *EP*, são os seguintes (Figura A.2.4):

- Cobertura verde extensiva DOWNSTREAM :PT. (0,57 kg Phosphate-Equiv.)
- 8 Betão leve de argila expandida - *Lightweight concrete block PE: EU-27* (0,04 kg Phosphate-Equiv.)

e. CML2001 - Nov. 2010, Global Warming Potential (GWP 100 years) [kg CO2-Equiv.]

Os processos que apresentam os valores mais significativos (por ordem decrescente), no que respeita à “quantidade” *GWP 100 years*, são os seguintes (Figura A.2.5):

- 8 Betão leve de argila expandida - *Lightweight concrete block PE: EU-27* (13,94 kg CO2-Equiv) ;
- 2 Substrato de crescimento: PT;
- 5 Placas de poliestireno extrudido - *General purpose polystyrene (GPPS) PlasticsEurope :EU-27*;
- 6 Membrana de impermeabilização bicapa (Membrana de impermeabilização de betume polímero APP);
- 4 Lâmina granular de polietileno de alta densidade - *Polyethylene high density granulate (PE-HD) ELCD/PlasticsEurope: RER*;
- Processo de referência: *Cobertura verde extensiva DOWNSTREAM :PT* (emissão “negativa” de CO2 de devido ao *contributor* “sequestro do CO2” na fase de utilização = - 4,19 kg CO2-Equiv. por unidade funcional de cobertura (m2)) (Figura 4.15):

Cobertura verde extensiva 1

Plano de processo GaBi Mass [kg]
Pré-Visualização da A1CV/CML2001 - Nov. 2010, Global Warming Potential (GWP 100 years)
Os nomes dos processos básicos são mostrados.



Figura 4.15 - (GWP 100 years) [kg CO2-Equiv.] em percentagens, plano GaBi “cobertura verde extensiva 1”, (PE Int'l, GaBi 2014).

f. CML2001 - Nov. 2010, Ozone Layer Depletion Potential (ODP, steady state) [kg R11-Equiv.]

Os processos que apresentam os valores mais significativos (por ordem decrescente), no que respeita à “quantidade” ODP, steady state são os seguintes (Figura A.2.6):

- Cobertura verde extensiva DOWNSTREAM :PT (45 E-4 kg R11-Equiv.)

g. CML2001 - Nov. 2010, Photochem. Ozone Creation Potential (POCP) [kg Ethene-Equiv.]

Os processos que apresentam os valores mais significativos (por ordem decrescente), no que respeita à “quantidade” POCP, são os seguintes (Figura A.2.7):

- Cobertura verde extensiva DOWNSTREAM :PT (4,71 E-3 kg Ethene-Equiv.).
- 8 Betão leve de argila expandida - *Lightweight concrete block PE*: EU-27 (3,04 E-3 kg Ethene-Equiv.);
- 6 Membrana de impermeabilização bicapa (Membrana de impermeabilização de betume polímero APP);
- 5 Placas de poliestireno extrudido - *General purpose polystyrene (GPPS) PlasticsEurope*: EU-27;
- 4 Lâmina granular de polietileno de alta densidade - *Polyethylene high density granulate (PE-HD) ELCD/PlasticsEurope*: RER.

h. Outros indicadores significativos

i. CML2001 - Nov. 2010, Freshwater Aquatic Ecotoxicity Pot. (FAETP inf.) [kg DCB-Equiv.]

Os processos que apresentam os valores mais significativos (por ordem decrescente), no que respeita à “quantidade” FAETP inf., são os seguintes (Figura A.2.8):

- 4 Lâmina granular de polietileno de alta densidade - *Polyethylene high density granulate (PE-HD) ELCD/PlasticsEurope*: RER (0,163 kg DCB-Equiv.);
- 6 Membrana de impermeabilização bicapa (Membrana de impermeabilização de betume polímero APP);
- 8 Betão leve de argila expandida - *Lightweight concrete block PE*: EU-27.

ii. CML2001 - Nov. 2010, Marine Aquatic Ecotoxicity Pot. (MAETP inf.) [kg DCB-Equiv.]

Os processos que apresentam os valores mais significativos (por ordem decrescente), no que respeita à “quantidade” MAETP inf., são os seguintes (Figura A.2.9):

- 8 Betão leve de argila expandida - *Lightweight concrete block PE*: EU-27 (2 267,8 kg DCB-Equiv.);
- 6 Membrana de impermeabilização bicapa (Membrana de impermeabilização de betume polímero APP).

Um quadro-síntese (Tabela 4.14) foi elaborado para visualizar as camadas funcionais (processos) com maior impacto (positivo ou negativo) no ambiente. Esses impactos foram quantificados através dos indicadores de categoria de impacto *CML2001 - Nov. 2010*. Apresentam-se de seguida e por ordem decrescente de relevância, (um betão leve e 3 plásticos):

- 8 Betão leve de argila expandida - *Lightweight concrete block PE: EU-27; (Processes; Construction industry; Construction materials; Stones and elements);*
- 6 Membrana de impermeabilização bicapa (Membrana de impermeabilização de betume polímero APP); 5 Placas de poliestireno extrudido - *General purpose polystyrene (GPPS) PlasticsEurope :EU-27;* 4 Lâmina granular de polietileno de alta densidade - *Polyethylene high density granulate (PE-HD) ELCD/PlasticsEurope: RER*

O processo *Cobertura verde extensiva DOWNSTREAM :PT* apresenta um impacto positivo no ambiente de 4,19 kg CO₂-Equiv. por m² (*GWP 100 years*), ocorrido na etapa do ciclo de vida *gate to grave*. Relativamente a impactos negativos no ambiente pode concluir-se preliminarmente o seguinte:

- Os contributos mais significativos para *Abiotic Depletion (ADP fossil)* dizem respeito a 2 camadas funcionais: 6 *Membrana de impermeabilização bicapa;* 5 *Placas de poliestireno extrudido;*
- Os contributos mais significativos para *Acidification Potential (AP)* dizem respeito à camada funcional 8 *Betão leve de argila expandida;*
- Os contributos mais significativos para *Freshwater Aquatic Ecotoxicity Pot. (FAETP inf.) [kg DCB-Equiv.]* dizem respeito à camada funcional 4 *Lâmina granular de polietileno de alta densidade - Polyethylene high density granulate (PE-HD) ELCD/PlasticsEurope: RER;*
- Os contributos mais significativos para *Marine Aquatic Ecotoxicity Pot. (MAETP inf.) [kg DCB-Equiv.]* dizem respeito à camada funcional 8 *Betão leve de argila expandida - Lightweight concrete block PE: EU-27.*

Tabela 4.14 - Quadro-síntese dos indicadores de categoria de impacto *CML2001 - Nov. 2010* para as camadas funcionais da cobertura verde extensiva (por m² de unidade funcional).

(Processos/Planos) / Indicadores	CML2001 - Nov. 2010							Outros indicadores significativos (CML2001 - Nov. 2010)	
	Abiotic Depletion (ADP elements) [kg Sb-Equiv.]	Abiotic Depletion (ADP fossil) [MJ]	Acidification Potential (AP) [kg SO ₂ -Equiv.]	Eutrophication Potential (EP) [kg Phosphate-Equiv.]	Global Warming Potential (GWP 100 years) [kg CO ₂ -Equiv.]	Ozone Layer Depletion Potential (ODP, steady state) [kg R11-Equiv.]	Photochem. Ozone Creation Potential (POCP) [kg Ethene-Equiv.]	Freshwater Aquatic Ecotoxicity Pot. (FAETP inf.) [kg DCB-Equiv.]	Marine Aquatic Ecotoxicity Pot. (MAETP inf.) [kg DCB-Equiv.]
1 Camada vegetal: PT									
1a Seixo rolado (proteção pesada)									
2 Substrato de crescimento: PT									
3 Manta geotêxtil de fibras sintéticas - Polypropylene fibers (PP) PE :EU-27									
4 Lâmina granular de polietileno de alta densidade - Polyethylene high density granulate (PE-HD) ELCD/PlasticsEurope <agg>:RER								0,163 kg DCB-Equiv.	
5 Placas de poliestireno extrudido - General purpose polystyrene (GPPS) PlasticsEurope :EU-27		157 MJ							
6 Membrana de impermeabilização bicapa (Membrana de impermeabilização de betume polímero APP)		274 MJ							
7 Emulsão betuminosa - Bitumen at refinery PE :EU-27									
8 Betão leve de argila expandida - Lightweight concrete block PE: EU-27			0,65 kg SO ₂ -Equiv.	0,04 kg Phosphate-Equiv.	13,9 kg CO ₂ -Equiv.		3,04 E-3 kg Ethene-Equiv.		2 267,8 kg DCB-Equiv.
Cobertura verde extensiva DOWNSTREAM :PT	3 kg Sb-Equiv.			0,57 kg Phosphate-Equiv.	4,19 kg CO ₂ -Equiv.	45 E-4 kg R11-Equiv.	4,71 E-3 kg Ethene-Equiv.		
Impactos positivos									
Impactos negativos									

4.2. AVALIAÇÃO

O objetivo da avaliação é aumentar a fiabilidade (*reliability*) duma ACV. 3 métodos de verificação foram utilizados para realizar essa avaliação de resultados (PE Int'l, GaBi. 2014):

- Verificação da integralidade (*completeness*): Na verificação da integralidade, qualquer informação inexistente ou incompleta foi analisada para observar da sua necessidade para satisfazer o objetivo e âmbito da ACV. Em geral,

os dados em falta deverão ser adicionados ou recalculados para preencher as lacunas ou, alternativamente, a definição de objectivo e âmbito poderá ser ajustada.

- Verificação de sensibilidade: A verificação de sensibilidade determina como os resultados são afetados por incertezas nos dados, suposições, métodos de alocação, procedimentos de cálculo, etc. Este é um elemento especialmente importante quando são comparadas diferentes alternativas, para que a existência de diferenças significativas ou a falta delas possa ser compreensível e fiável.
- Verificação de consistência: Algumas questões relevantes para verificação são: a qualidade dos dados, os limites do sistema, a simetria de dados de período de tempo e região, as regras de alocação e a avaliação de impacto.

4.2.1. Indicadores de qualidade de dados

A abordagem da qualidade de dados do *software* utilizado nesta dissertação é estruturada em 6 DQIs (DQIs: *Data Quality Indicators*), cada qual com os respectivos critérios de avaliação (PE Int'l, GaBi. 2014): i) contexto da decisão; ii) Indicadores de Qualidade de Dados (DQIs: *Data Quality Indicators*): representatividade (tecnológica; geográfica; temporal); integridade; consistência; incerteza / precisão; qualidade geral.

Os indicadores de qualidade servem para documentar a qualidade dos dados, garantindo a reprodutibilidade dos resultados de balanço e para aumentar a sua transparência. Todas bases de dados *Gabi* incluem quatro categorias diferentes, com os correspondentes indicadores de qualidade. Os indicadores de qualidade podem ser tanto qualitativos como quantitativos, tal como é listado de seguida:

- Representatividade (tecnológica, geográfica, temporal): A informação sobre a representatividade de dados é avaliada qualitativamente e reflete a extensão para a qual o conjunto de dados (*datasets*) representa a realidade de um determinado processo ou cadeia de processos, p.e., completamente, parcialmente ou não representativo.
- Integridade: A integridade fornece informações sobre a percentagem de fluxos medidos, estimados ou gravados, bem como as emissões não declaradas. Nas bases de dados *Gabi* é adotado o seguinte procedimento: i) origem de dados nos processos (calculado; estimado; medido; literatura); ii) integridade dos planos (todos os processos ligados; processos individuais relevantes ligados; todos os processos relevantes ligados; alguns processos relevantes não ligados) iii) integridade de processos (todos os fluxos capturados; todos os fluxos relevantes gravados; fluxos individuais relevantes gravados; alguns fluxos relevantes não gravados).
- Consistência: O balanço de massa (*mass balance*) proporciona uma indicação da consistência de um processo. *Inputs and outputs* dum processo podem ser comparados com outros, através da função de verificação de consistência (*Gabi consistency check*).
- Incerteza: Este Indicador de Qualidade de Dados será desenvolvido no capítulo seguinte.

4.2.2. Quantificação da incerteza

A incerteza numa ACV pode ser dividida em duas partes: i) incerteza de dados (a incerteza do modelado, medido, calculado, estimado) e de dados dentro de cada unidade de processo; ii) incerteza do modelo (incerteza introduzida nos resultados da análise de inventário de ciclo de vida (LCI) devido aos efeitos cumulativos da imprecisão do modelo, da incerteza de *inputs* e da variabilidade de dados).

Um balanço *Gabi* compara todos os *inputs* de um ou vários objetos com os seus *outputs*. O sistema *Gabi* calcula esses balanços utilizando os dados fornecidos nos processos (ou planos de processos) e permite várias análises dos balanços. A função *Gabi Analyst* permite a geração de várias análises de balanço (*scenario analysis, parameter variation, sensitivity analysis, Monte Carlo analysis*), as quais serão descritas seguidamente (PE Int'l, GaBi. 2014):

- Análise de cenários: Na análise de cenários dois ou mais cenários poderão ser justapostos, utilizando a função *Gabi Analyst*.
- Variação de parâmetros: A utilização de parâmetros na ferramenta *Gabi* permite que os utilizadores alterem os valores das quantidades de fluxo variáveis. Podem ser utilizados para calcular quantidades de fluxo que dependem de outras quantidades de fluxo, em parâmetros técnicos ou em propriedades de fluxo (p.e., para calcular a emissão de CO₂ de uma central de energia, dependendo da quantidade de combustível e do conteúdo de carbono do combustível). Ajustar os parâmetros recalcula as quantidades de fluxo, substituindo a relação rígida de *inputs-outputs* existente dos fluxos de um processo.

- Análise de sensibilidade: Na análise de sensibilidade pode ser examinada a sensibilidade dos valores dos resultados em relação à variação de parâmetros de modelo individuais. Um cenário básico bem como um valor máximo é por isso necessário para cada parâmetro do modelo.
- Análise de Monte Carlo: Com a *Monte Carlo analysis*, os erros de uma alocação específica para parâmetros selecionados são removidos e correspondentemente são determinados os resultados do balanço. Para cada balanço de modelo, são necessários um cenário e um valor mínimo e máximo..

Qual a robustez dos resultados globais tendo em consideração as incertezas combinadas? O esforço para chegar a uma estimativa razoável pode ser significativamente reduzido, se for seguida uma abordagem de duas fases (PE Int'l, GaBi. 2014):

- Compreender a estrutura do modelo e as suas dependências: Simplificar o modelo desde o início, começando pela criação do modelo com os valores detidos. De seguida, tentar desenvolver uma compreensão dos aspectos mais relevantes do modelo de ACV, i.e., aquelas fases do ciclo de vida, *contributors* ou *data points*, que têm o maior impacto sobre os resultados. Isto é geralmente realizado, recorrendo a uma análise de contribuição ou análise *hot spot* e subsequente análise de sensibilidade. Ambas as funções estão disponíveis para utilizadores da ferramenta *GaBi* na folha de balanços (*balance sheet*) da ACV através das funções *Weak Point Analysis* e *GaBi Analyst*.
- Testar a robustez dos resultados do modelo: Este passo consiste em concentrar os esforços na estimativa do nível de incerteza de cada um dos parâmetros-chave identificados. Poderá ser necessário fazer mais alguma pesquisa para estabelecer limites superiores e inferiores para os parâmetros pertinentes. Quanto maior for a incerteza, maiores serão esses intervalos. O efeito combinado dessas incertezas pode então ser avaliado, utilizando a simulação de Monte-Carlo disponível em *GaBi Analyst*. Ao definir intervalos de incerteza em torno dos parâmetros-chave, a simulação de Monte Carlo é capaz de produzir uma estimativa estatística (valor médio) do resultado final, bem como o seu desvio padrão em todas as simulações.

5. CONCLUSÕES FINAIS E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

5.1. CONCLUSÕES GERAIS

A análise da sustentabilidade do ciclo de vida pode ser realizada a três diferentes níveis: produto, *meso* ou economia. A ACV desta dissertação realizou-se no primeiro nível. No entanto, os resultados desta ACV devem ser interpretados sob dois diferentes pontos de vista: escala de produto (edifício) e escala urbana (cidade ou bairro).

No primeiro, os resultados da Análise Energética do Ciclo de Vida (LCEA) comparativa demonstram que a cobertura verde extensiva não apresenta vantagens relativamente à cobertura convencional de referência, visto que consome mais recursos energéticos ao longo do seu ciclo de vida. Pelo contrário, no segundo nível (instalação de coberturas verdes à escala urbana) e com base nos resultados da literatura pesquisada, demonstra-se que a cobertura verde extensiva tem vantagens relativamente à cobertura convencional, visto que - devido ao efeito indireto da redução da Ilha de Calor Urbana (ICU) - consome menos recursos energéticos ao longo do seu ciclo de vida, com uma consequente redução nos impactos ambientais. Isto confirma o potencial das coberturas verdes extensivas como instrumento ambiental de intervenção urbanística (PDM, 2012).

Regressando ao ponto de vista (produto), os resultados da Avaliação de Impacte do Ciclo de Vida (LCIA) comparativa demonstram que a cobertura verde extensiva apenas tem vantagens relativamente à cobertura convencional no contexto dum cenário (B) que não inclui a energia operacional, i.e., a cobertura verde extensiva tem um impacte menor relativo, em termos de potencial de aquecimento global (*GWP 100 years*), devido ao *input* de CO₂ produzido pela camada funcional vegetal equivalente ao sequestro de dióxido carbono ao longo da sua vida útil (90 anos).

O impacte positivo no ambiente é equivalente a 4,19 kg CO₂-Eq. por m² (*GWP 100 years*). A uma escala urbana, a aplicação do valor anterior numa área de implantação de coberturas verdes extensivas de 10 milhões de m² (aprox. 10% do município de Lisboa) seria equivalente à poupança na emissão de CO₂ de mais de 300 milhões de km percorridos por novos automóveis, uma grande remoção líquida de CO₂ da atmosfera durante um período sustentado. "Uma grande parte das mudanças climáticas antropogénicas resultantes de emissões de CO₂ é irreversível numa escala temporal multi-secular a milenar, exceto no caso de uma grande remoção líquida de CO₂ da atmosfera durante um período sustentado" (IPCC, 2013).

5.2. CONCLUSÕES ESPECÍFICAS

De entre todos os fluxos elementares do Inventário de Ciclo de Vida (LCI), são os 3 seguintes aqueles que apresentaram valores mais significativos em termos de massa (kg), ocorrendo principalmente durante a etapa do ciclo de vida DOWNSTREAM (*gate to grave*), isto devido ao considerável "peso" da consumo de energia térmica da componente do edifício - cobertura verde extensiva - durante a fase de utilização:

- recursos materiais renováveis, particularmente "água" (água dos lagos e água dos rios);
- resíduos designados de "bens depositados", particularmente "pilhas de stocks - sobrecargas depositadas";
- emissões para a água doce, particularmente "água" (água do rio da tecnosfera, turbinada (energia hídrica)).

Da análise térmica comparativa obtiveram-se valores aproximados serviram para calcular os consumos energéticos anuais na fase de utilização do edifício, introduzidos como *inputs* de energia operacional no modelo criado com a ferramenta *Gabi*, considerando um tempo de vida útil das coberturas de 90 anos. Considerou-se que as coberturas avaliadas eram componentes dum edifício em fase de projeto (não construído), localizado em Lisboa, cidade com um clima temperado de Verão quente e seco (Csa), segundo a classificação climática de *Köppen-Geiger*. Considerando os dois cenários analisados, alcançaram-se as seguintes conclusões finais:

Relativamente ao Cenário A (inclui a energia operacional), dos resultados da Análise Energética do Ciclo de Vida (LCEA) comparativa, conclui-se que a cobertura verde extensiva consome mais recursos energéticos - mais 33% do que cobertura convencional de referência. Observando numa perspectiva temporal da contribuição das etapas do ciclo de vida para os resultados desta ACV, constata-se que a etapa do ciclo de vida DOWNSTREAM (*gate to grave*) revela valores de recursos energéticos substancialmente superiores aos da etapa UPSTREAM_CORE (*cradle to gate*). Isto é causa do efeito cumulativo da energia operacional durante o tempo de vida útil do edifício.

Relativamente ao Cenário B (não inclui a energia operacional), dos resultados da LCEA comparativa conclui-se que a cobertura verde extensiva consome mais recursos energéticos - mais 15% do que cobertura convencional de referência, mas com um valor 18% inferior ao resultado do Cenário A. Isto deve-se à diferença entre as energias incorporadas (EE) da camada de protecção pesada (seixo rolado) da cobertura convencional de referência e a camada de substrato de crescimento da cobertura verde extensiva (EE = 0,083 MJ/kg; *Material Profile: Aggregate; General Aggregate*; EE = 0,45 MJ/kg; *Material Profile: Soil; General (Rammed) Soil*; ICE, (2011)).

No que respeita à contribuição das etapas do ciclo de vida para os resultados, conclui-se que, inversamente ao Cenário A, a etapa do ciclo de vida DOWNSTREAM (*gate to grave*) revela valores de recursos energéticos substancialmente inferiores à etapa UPSTREAM_CORE (*cradle to gate*), revelando neste caso a importância da energia incorporada na etapa de produção industrial.

No que concerne à comparação cumulativa da energia operacional e da energia incorporada no Cenário A, conclui-se o seguinte: assumindo uma taxa de crescimento média constante ao longo do tempo de vida útil de 9 décadas, a energia operacional acumula-se desde OE=1,479 GJ/kg.m² até OE=13,318 GJ/Kg.m². Como seria previsível, a energia incorporada (EE) das coberturas em análise tem uma taxa de crescimento muito inferior à energia operacional (OE), visto que não depende do utilizador, nem é influenciável ao longo do longo ciclo de vida, exceto em ações de manutenção e reabilitação. Considerando estas aproximações, pode-se afirmar que a energia operacional iguala e ultrapassa a energia incorporada durante os primeiros 10 anos de utilização (EE=OE= 838 MJ/kg.por m² de cobertura verde extensiva; EE=OE= 751 MJ/kg.por m² de cobertura convencional). A energia incorporada pode ser equivalente a muitos anos de energia operacional. Recomenda-se que, para além do esforço que tem sido colocado na redução de energia operacional, através da melhoria da eficiência energética da envolvente dos edifícios, seja também dirigida atenção para o conteúdo de energia incorporada inicial dos materiais, que ocorre uma só vez na fase industrial de produção (*cradle to gate*).

Da análise comparativa das coberturas "verde extensiva" e "convencional" (LCIA e relativamente ao Cenário A (inclui a energia operacional) pode concluir-se que os indicadores de categorias de impacto que apresentam diferenças significativas são os dois seguintes, verificando-se que essas diferenças encontradas são muito mais acentuadas na etapa do ciclo de vida DOWNSTREAM (*gate to grave*), em favor da solução de referência "convencional" (menores impactes): i) esgotamento de recursos abióticos (fósseis) (*ADP fossil*) [MJ]; ii) aquecimento global (*GWP 100 years*) [kg CO₂-Equiv.]. Estes resultados devem-se ao "peso" substancial do consumo de energia térmica da componente do edifício durante a fase de utilização.

No que diz respeito ao Cenário B (não inclui a energia operacional) considera-se o seguinte: Da análise comparativa "verde extensiva" vs "convencional" conclui-se que os indicadores de categoria de impacto que apresentam diferenças significativas são os seguintes:

- Esgotamento de recursos abióticos (fósseis) (*ADP fossil*) [MJ]: A diferença "verde extensiva" vs "convencional" apresenta um valor positivo significativo, o que significa que a cobertura "verde extensiva" tem um impacto maior relativo, localizado temporalmente na etapa do ciclo de vida DOWNSTREAM (*gate to grave*).
- Potencial de aquecimento global (*GWP 100 years*) [kg CO₂-Equiv.]: A diferença "verde extensiva" vs "convencional" apresenta um valor negativo significativo, o que significa que a cobertura "verde extensiva" tem um impacto menor relativo, localizado parcialmente na etapa do ciclo de vida DOWNSTREAM (*gate to grave*). Estas quantidades do indicador *GWP 100 years* explicam-se pelo *input* (fluxo de CO₂) no processo *Cobertura verde extensiva DOWNSTREAM*, produzido pela camada funcional vegetal e equivalente à captura de dióxido carbono.

A evolução do potencial de aquecimento global (*GWP 100 years*) acumulado ao longo da vida útil da cobertura verde extensiva (90 anos) - comparando o "Desenvolvimento Convencional" com o "Desenvolvimento incluindo sequestro de CO₂" - conduz às seguintes conclusões: i) obteve-se uma redução média de 28% do indicador *GWP 100 years*, no intervalo temporal de 9 décadas; ii) durante a etapa do ciclo de vida *cradle to gate* (ocorrida na 1ª década,) dá-se a amortização do "Carbono Incorporado" (EC) via "sequestro de CO₂ na biomassa"

Esta análise expande a presente ACV para a inclusão de impactes (líquidos) positivos no ambiente, no sentido de demonstrar que é possível conceber edifícios que funcionem como sumidouros de carbono (*carbon sinks*) e como partes activas dos ecossistemas, tendo em consideração os seguintes factores: tempo de ciclo de vida, inovação tecnológica e espaço urbano.

Com base na análise comparativa de camadas funcionais (LCIA), apresentam-se as camadas funcionais (processos) com maior impacto (positivo ou negativo) no ambiente, por ordem decrescente de relevância - um betão leve e 3 plásticos (impactes foram quantificados através dos indicadores de categoria de impacto CML2001 - Nov. 2010):

- Camada de forma (*layer* 8: Betão leve de argila expandida);
- Membrana de impermeabilização bicapa de betume polímero APP (*layer* 6: Membrana de impermeabilização bicapa);
- Isolamento térmico (*layer* 5: Placas de poliestireno extrudido)
- Camada drenante (*layer* 4: Lâmina granular de polietileno de alta densidade)

Os materiais com menor energia incorporada, tais como o betão, tijolos e madeira, são geralmente consumidos em grandes quantidades na construção de edifícios. Materiais com alto conteúdo energético - como, por exemplo, o aço inoxidável - são muitas vezes utilizados em menores quantidades. Como resultado, a maior quantidade de energia incorporada num edifício pode advir de materiais de baixa energia incorporada, tais como o betão ou de materiais de alta energia incorporada, como o aço. Este raciocínio aplica-se à camada funcional da cobertura verde extensiva com impacto mais significativo: a camada de forma de betão leve de argila expandida pesa 48 kg/m², apesar de apresentar um coeficiente de energia incorporada inferior aos materiais plásticos.

Relativamente à etapa do ciclo de vida DOWNSTREAM (*gate to grave*), o processo “cobertura verde extensiva” apresenta um impacto positivo no ambiente de 4,19 kg CO₂-Equiv. (*GWP 100 years*). Numa área de implantação de coberturas verdes extensivas de 10 000 000 m² (cerca de 10% do município de Lisboa), este valor representaria potencialmente um “eco-custo” negativo equivalente à poupança na emissão de CO₂ de 322 307 692 kg percorridos por novos automóveis de passageiros, (considerando a *EU Regulation No 443/2009* que define um objectivo médio de emissões de CO₂ de 0,130 kg/km (ICCT, 2014)).

De seguida apresentam-se as camadas funcionais constituintes da cobertura verde extensiva com contributos mais significativos para as categorias de impacto selecionadas na presente ACV (impactes ambientais negativos):

- Esgotamento de recursos abióticos (fósseis) (ADP fossil): Membrana de impermeabilização bicapa de betume polímero APP (*layer* 6: Membrana de impermeabilização bicapa); Isolamento térmico (*layer* 5: Placas de poliestireno extrudido);
- Potencial de acidificação (AP): Camada de forma (*layer* 8: Betão leve de argila expandida);
- *Freshwater Aquatic Ecotoxicity Potential* (FAETP inf.) [kg DCB-Equiv.]: Camada drenante (*layer* 4: Lâmina granular de polietileno de alta densidade);
- *Marine Aquatic Ecotoxicity Potential* (MAETP inf.) [kg DCB-Equiv.]: Camada de forma (*layer* 8: Betão leve de argila expandida).

5.3. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

Antes de mais interessa declarar que as conclusões apresentadas são baseadas em simplificações previamente assumidas e definidas em cada processo analisado. Isto deve-se à limitação de recursos inerente a esta dissertação, pelo que se sugere, no futuro, um desenvolvimento desta AVC simplificada, no sentido de apurar o seu nível de detalhe.

As coberturas verdes de tipologia extensiva são produtos sustentáveis no longo prazo, mas é evidente que certos materiais constituintes, como os plásticos, precisam de ser melhorados ou substituídos por produtos mais ecológicos e sustentáveis. Do que foi exposto, pode-se concluir que é necessária mais investigação nas seguintes vertentes da área dos materiais das suas camadas funcionais (camada de forma, membrana de impermeabilização, isolamento térmico e camada drenante), tendo como objetivo a melhoria do seu desempenho ambiental (e energético):

- melhoria da eficiência energética das habitações e dos equipamentos - redução dos níveis de energia operacional;
- melhoria da eficiência energética das indústrias produtoras - redução dos níveis de energia incorporada dos materiais;
- reutilização de materiais de construção - grande redução dos níveis de energia incorporada dos materiais;
- reciclagem de materiais para reprocessamento - redução dos níveis de energia incorporada dos materiais;
- selecção de novos materiais - redução dos níveis de energia incorporada dos materiais.

A energia incorporada pode ser equivalente a muitos anos de energia operacional. Para além do esforço que tem sido colocado na redução de energia operacional, através da melhoria da eficiência energética da envolvente dos edifícios, também deve ser dirigida atenção para o conteúdo de energia incorporada inicial dos materiais, que ocorre uma só vez na fase industrial de produção.

O efeito de escala joga a favor das coberturas verdes extensivas. O efeito indireto da diminuição da temperatura - redução da Ilha de Calor Urbana (ICU) - devido à instalação de coberturas verdes à escala urbana provocaria uma diminuição das necessidades de consumo energético na fase de utilização dum edifício, fator esse que não foi contabilizado na presente ACV, mas que pode ser avaliado aproximadamente, calculando o produto dessas poupanças energéticas por m² pela área (m²) de implantação de coberturas verdes na cidade de Lisboa. Portanto, os impactos do ciclo de vida poderão ser consideravelmente reduzidos se esta solução construtiva for utilizada a uma escala urbana, exigindo uma análise mais aprofundada.

Finalmente, o impacto positivo no ambiente gerado pela cobertura verde extensiva analisada - em termos de aquecimento global (*GWP 100 years*) - confirma o potencial deste produto como instrumento ambiental de intervenção urbanística, considerando as necessidades definidas no Plano Diretor Municipal de Lisboa que “pretende aumentar a presença de áreas verdes e permeáveis nas coberturas de edifícios” (PDM, 2012).

BIBLIOGRAFIA

- Abeysundra UGY, Babel S, Gheewala S, Sharp A. (2007) Environmental, economic and social analysis of materials for doors and windows in Sri Lanka. *Building and Environment* 2007;5:2141–2149.
- Adalberth K, Almgren A, Petersen EH. (2001) Life cycle assessment of four multi family buildings. *Int J Low Energy Sustainable Build* 2001;2.
- Akbari, H.; Konopacki (2005) S. Calculating energy-saving potentials of heat island reduction strategies. *Energy Policy* 2005, 33 (6), 721–56.
- Alcazar, S. Bass, B. (2005) Energy performance of green roofs in a multi-storey residential building in Madrid. *Proceedings of the Third Annual International Green Roofs Conference: Greening Rooftops for Sustainable Communities*. Washington, DC, USA.
- Alcoforado, M. J. Lopes, A. Andrade, H. e Vasconcelos, J. (2006) Orientações climáticas para o ordenamento em Lisboa, Universidade de Lisboa, Centro de Estudos Geográficos, Área de investigação de Geo-Ecologia, Lisboa, Portugal.
- Alves, A. (2014) Aplicação da Avaliação do Ciclo de Vida a Projeto de Reabilitação Urbana De Coberturas Verdes na Cidade de Lisboa. PLURIS 2014, 6º Congresso Luso-Brasileiro para Planeamento Urbano, Regional, Integrado e Sustentável; (Re)inventar a cidade em tempos de mudança; Fundação Calouste Gulbenkian; Lisboa, Setembro 2014. http://pluris2014.fa.ulisboa.pt/docs/Pluris2014_Livro_de_Actas.pdf
- Anastaselos, D., Giama, E., & Papadopoulos, A. M. (2009). An assessment tool for the energy, economic and environmental evaluation of thermal insulation solutions. *Energy and Buildings*, 41(11), 1165-1171
- Ardente F, Beccali M, Cellura M, Mistretta M. (2008) Building energy performance: a LCA case study of kenaf-fibres insulation board. *Energy and Buildings* 2008..
- Asdrubali F, Baldassarri C, Fthenakis V. (2013) Life cycle analysis in the construction sector: guiding the optimization of conventional Italian buildings. *Energy and Buildings* 2013;64:73–89.
- Asif M, Muneer T, Kelley R. (2007) Life cycle assessment: a case study of a dwelling home in Scotland. *Building and Environment* 2007;42(3)..
- Assefa G, Glaumann M, Malmqvist T, Kindembe B, Hult M, Myhr U, Eriksson O (2007) .Environmental assessment of building properties-where natural and social sciences meet: the case of EcoEffect. *Building and Environment* 2007;3: 1458–64.
- Assies, J. A. (1998) A risk-based approach to life-cycle impact assessment. *J. Hazard. Mater*, 61 (1), 23–29.
- Assies, J. A. (1991) Introduction paper to SETAC-Europe workshop on environmental life cycle analysis of products. In *Life-Cycle Assessment, Proceedings of a SETAC-Europe workshop on Environmental Life Cycle Assessment of Products*, December 2- 3 1991, Leiden; SETAC-Europe: Brussels, Belgium.
- Athena Institute, EcoCalculator. Ontario, Canada.
- Baena, L. M. (2012). Estudi d'anàlisi de cicle de vida de cubicles amb coberta vegetada. Universitat de Lleida. Escola Politècnica Superior; Cabeza, Luisa F.; Rincon, Lidia. Retrieved from <http://hdl.handle.net/10459.1/45993>
- Baldwin R, Russel P, Nibel S, Boonstra C, Lützkendorf T. (2000.) Results of IEA-ECBCS Annex 31 work on environmental assessment of buildings and related tools. In *proceedings of the Sustainable Building Conference 2000*, Maastricht, the Netherlands.

- Batista, S. B. (2004) Impermeabilização de coberturas em terraço: Directrizes para o projecto. Dissertação para obtenção de grau de Mestre em Construção. Universidade Técnica de Lisboa, Instituto Superior Técnico. Lisboa, Portugal.
- Baumann, H.; Tillman, A.-M. (2004) The Hitch hiker's Guide to LCA - An orientation in life cycle assessment methodology and application; Studentlitteratur: Lund, Sweden.
- Bekker, P. (1982). A life-cycle approach in building. *Building and Environment*, 17(1), 55-61.
- Bianchini, F., & Hewage, K. (2012). How "green" are the green roofs? Lifecycle analysis of green roof materials. *Building and Environment*, 48, 57-65.
- Billiton Technology BHP (2012) LISA (LCA in Sustainable Architecture).
- Björk, H.; Rasmuson, A. (2002) A method for life cycle assessment environmental optimization of a dynamic process exemplified by an analysis of an energy system with a superheated steam dryer integrated in a local district heat and power plant. *Chem. Eng. J.*, 87 (3), 381–394.
- Blackhurst, M., Hendrickson, C., & Matthews, H. S. (2010). Cost-effectiveness of green roofs. *Journal of Architectural Engineering*, 16(4), 136-143.
- Blengini, G. A., & Di Carlo, T. (2010). The changing role of life cycle phases, subsystems and materials in the LCA of low energy buildings. *Energy and Buildings*, 42(6), 869-880.
- Bovea MD, Díaz-Albo E, Gallardo A, Colomer FJ, Serrano J. (2010) Environmental performance of ceramic tiles: improvement proposals. *Materials & Design*; 31(1):35e41.
- Buchanan A, Levine B. (1999) Wood-based building materials and atmospheric carbon emissions. *Environmental Science and Policy*; 2:427e37.
- Buyle M, Braet J, Audenaert A.(2013) Life cycle assessment in the construction sector: a review. *Renewable & Sustainable Energy Reviews* ;26:379–88.
- Cabeza, L. F., Rincón, L., Vilariño, V., Pérez, G., & Castell, A. (2014). Life cycle assessment (LCA) and life cycle energy analysis (LCEA) of buildings and the building sector: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 29(0), 394-416.
- CALCAS Co-ordination Action for innovation in Life-Cycle Analysis for Sustainability Website.<http://www.calcasproject.net/>
- CAMPIOLI A. and LAVAGNA M. (2007) "Integrating life cycle assessment in building environmental and energy certification". International Conference "Sustainable Building 2007" - South Europe, Torino, Italy: Moro, Andrea, iiSBE, pp. 25-32.
- Carter, T., & Keeler, A. (2008). Life-cycle cost–benefit analysis of extensive vegetated roof systems. *Journal of Environmental Management*, 87(3), 350-363.
- Castleton, H.F. Stovin, V. Beck, S.B.M. Davison, J.B. (2010) Green roofs: building energy savings and the potential for retrofit. *Energy and Buildings*, volume 42. Elsevier, pp. 1582–1591.
- CEN, CEN/TC 350 (2007) Sustainability of construction work, Standard under development; [web page], <http://www.cen.eu/>
- CEN. CEN/TC 350 (2005) Sustainability of for construction work. Executive summary; [web page], <http://www.cen.eu/>
- Chan, E. H., Qian, Q. K., & Lam, P. T. (2009) The market for green building in developed Asian cities—the perspectives of building designers. *Energy Policy*, 37(8), 3061-3070.
- Chang, Y., Ries, R. J., & Wang, Y. (2010) The embodied energy and environmental emissions of construction projects in China: an economic input–output LCA model. *Energy Policy*, 38(11), 6597-6603.

- Chen TY, Burnett J, Chau CK. (2001) Analysis of embodied energy use in the residential building of Hong Kong. *Energy*; 26:323e40
- Citherlet S, Di Guglielmo F, Gay JB. (2000) Window and advanced glazing systems life cycle assessment. *Energy Build* ; 32(3):225–34.
- Cole RJ, Kernan PC. (1996) Life-cycle energy use in office buildings. *Building and Environment*; 31(4):307e17.
- Collinge WO, Landis AE, Jones AK, Schaefer LA, Bilec MM. (2013) Dynamic life cycle assessment: framework and application to an institutional building. *International Journal of Life Cycle Assessment*; 18:538–52.
- Council, U.S.G.B. (2008) LEED rating systems.
- Crawford, R. H. (2008). Validation of a hybrid life-cycle inventory analysis method. *Journal of environmental management*, 88(3), 496-506.
- Crawford, R. H., Czerniakowski, I., & Fuller, R. J. (2010). A comprehensive framework for assessing the life-cycle energy of building construction assemblies. *Architectural science review*, 53(3), 288-296.
- Crawley D, Aho I. (1999) Building environmental assessment methods: applications and development trends. *Build Res Inf* ;27:300–8.
- Cushman, J. C. (2001) Crassulacean acid metabolism: A plastic photosynthetic adaptation to arid environments. *Plant Physiol.* 2001, 127, 1439–1448.
- Dakwale VA, Ralegaonkar RV, Mandavgane S. (2011) Improving environmental performance of building through increased energy efficiency: a review. *Sustainable Cities and Society*; 4:211–218.
- De Gracia A, Rincón L, Castell A, Jiménez M, Boer D, Medrano M, et al. (2010) Life Cycle Assessment of the inclusion of phase change materials (PCM) in experimental buildings. *Energy and Buildings*; 42(9).
- Dunnett, N. e Kingsbury, N. (2008) *Planting Green Roofs and Living Walls*, Timber Press, London, UK.
- EC (2010) ILCD Handbook: General guide for life cycle assessment - provisions and action steps; European Commission, JRC-IES: Ispra, Italy,. Available at http://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/bitstream/JRC48157/ilcd_handbook-general_guide_for_lca-detailed_guidance_12march2010_isbn_fin.pdf <http://www.cen.eu/>.
- EC (2002) "Directive 2002/91/EC of the European Parliament and of the Council of 16 December 2002 on the energy performance of buildings (EPBD)": European Commission.
- EC (2010) European Commission - Joint Research Centre Life Cycle Thinking and Assessment Website. <http://eplca.jrc.ec.europa.eu/>
- Ecobilan (2001) P. TEAM/DEAM. Ecobilan, Price Waterhouse Coopers, Bethesda, MD.
- Environmental Protection Agency. (2006). *Life Cycle Assessment: Principles and Practice..* EPA/600/R-06/060. Office of Research and Development. Cincinnati, Ohio, USA.
- Eriksson O, Glaumann M, Assefa G. (2005) Life cycle impact assessment - a damage based weighting method for environmental impact assessment. In: *The international conference sustainable building in Tokyo*; Sept. 2005. Proceedings 04-068 p. 2047–2054.
- Erlandsson M, Borg M. (2003) Generic LCA-methodology applicable for buildings, constructions and operation services - today practice and development needs. *Building and Environment*; 7:919–38.
- Erlandsson, M., Lindfords, L. (2003) On the Possibilities to Apply the Result from an LCA Disclosed to Public. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 8(2), 65-73.

Finnveden, G.; Hauschild, M. Z.; Ekvall, T.; Guinée, J.; Heijungs, R.; Hellweg, S.; Koehler, A.; Pennington, D.; Suh, S. (2009) Recent developments in life cycle assessment. *J. Environ. Manage.*, 91 (1), 1–21.

FJiP – Fundació de la Jardineria y el Paisatge. Sítio de internet. Consultado em 3 de Novembro de 2014.
Disponível em <http://fjip-ntj.org/es/>

FLL (2008) Guidelines for the Planning, Construction and Maintenance of Green-Roofing – Green Roofing Guideline, Research foundation for landscaping issues (Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau), Bonn, Germany.

Flores-Colen, I. (2014) Manutenção Pró-Activa em Edifícios. Documentação da disciplina de Manutenção das Construções no âmbito do Mestrado em Construção e Reabilitação, Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, Portugal.

Flores-Colen, I. (2014) Revestimentos de coberturas em terraço. Documentação da disciplina de Revestimentos e Acabamentos no âmbito do Mestrado em Construção e Reabilitação, Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, Portugal.

Frankenstein S, Koenig G. (2004) FASST vegetation models. Technical Report TR-04-25. Hanover, NH: US Army Engineer Research and Development Center, Cold Regions Research and Engineering Laboratory.

Gedge, D. Frith, M. (2004) Green Roofs – Benefits and cost implications. A Report for Sustainable Eastside, Livingroofs.org. in association with Ecology Consultancy. Birmingham, UK..

Getter KL, Rowe DB, Robertson GP, Cregg BM, Andresen JA. (2009) *Environmental Science and Technology* ;43(19):7564e70.

Getter, K. L.; Rowe, D. B. (2006) The role of extensive green roofs in sustainable development. *HortScience* 2006, 41 (5), 1276–1285.

Goedkoop, M., & Spriensma, R. (2001). The eco-indicator99: A damage oriented method for life cycle impact assessment: Methodology report. Pré Consultants B.V, http://www.pre-sustainability.com/download/misc/EI99_methodology_v3.pdf

Goedkoop, M., Hofsteletter, P., Müller-Wenk, R., Spriensma, R. (1998) The Ecoindicator 98 Explained. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 3(6), 352-360.

Goedkoop, M.; Heijungs, R.; Huijbregts, M. A. J.; De Schryver, A. M.; Struijs, J.; van Zelm, J, R. (2009) ReCiPe 2008 - A life cycle impact assessment method which comprises harmonised category indicators at the midpoint and the endpoint level, 1st ed.; Report I: Characterisation, Available at <http://www.lcia-recipe.net/>

Golden CO, U.S. Life cycle inventory (LCI) database, ver. 1.6.0.

Gonçalves, H. Graça, J.M. (2004) Conceitos Bioclimáticos para os Edifícios em Portugal. Iniciativa Pública “Eficiência Energética nos Edifícios” (P3E), promovida pela Direção Geral de Geologia e Energia (DGGE); executada por ADENE, INETI, LNEC e IPQ; Lisboa, Portugal.

Goverse T. (2001) Wood innovation in the residential construction sector; opportunities and constraints resources. Conservation and Recycling. Grace M. (2000) BREEAM — a practical method for assessing the sustainability of buildings for the new millennium. In proceedings of the Sustainable Building Conference 2000, Maastricht, the Netherlands..

Grant, G. (2006) Green roofs and façades, IHS BRE Press, Bracknell, UK.

GRO – Green Roof Organisation (2011) The GRO Green Roof Code: Green roof code of Best Practice for the UK. Groundwork Sheffield. Sheffield, UK.

- Guggemos AA, Horvath A. (2006) Decision-support tool for assessing the environmental effects of constructing commercial buildings. *Journal of Architectural Engineering*; 4:187–95.
- Guinée, J. B., Gorée, M., Heijungs, R., Huppes, G., Kleijn, R., De Koning, A., ... & Weidema, B. P. (2001). Life cycle assessment - An operational guide to the ISO standards; Part 3, 'Scientific background'. *Ministry of housing, spatial planning and environment (VROM) and Centre of Environmental Science, Leiden University (CML), Den Haag and Leiden, The Netherlands*.
- Guinée, J. B., Heijungs, R., Huppes, G., Zamagni, A., Masoni, P., Buonamici, R., Rydberg, T. (2010) Life Cycle Assessment: Past, Present, and Future†. *Environmental science & technology*, 45(1), 90-96.
- Guinée, J. B.; Heijungs, R. (1993) A proposal for the classification of toxic substances within the framework of Life Cycle Assessment of Products. *Chemosphere*, 26 (10), 1925–1944.
- Guinée, J. B.; Udo de Haes, H. A.; Huppes, G. (1993) Quantitative life cycle assessment of products 1: Goal definition and inventory. *J. Clean. Prod.*, 1 (1), 3–13.
- Guinée, J.B.; Huppes, G.; Heijungs,R.; vanderVoet, E. (2009) Research strategy, programmes and exemplary projects on life cycle sustainability analysis (LCSA); Deliverable 22 of the CALCAS project, 2009. Available at <http://www.estis.net/sites/calcas/>
- Gustavsson L, Joelsson A, Sathre R. (2010) Life cycle primary energy use and carbon emission of an eight-storey wood-framed apartment building. *Energy and Buildings*; 42(2).
- Gustavsson L, Sathre R. (2006) Variability in energy and carbon dioxide balances of wood and concrete building materials. *Build Environ* 2006;41(7):940–51.
- Haapioo, A., & Viitaniemi, P. (2008). A critical review of building environmental assessment tools. *Environmental impact assessment review*, 28(7), 469-482, Chicago.
- Hauschild, M.; Wenzel, H. (1998) *Environmental Assessment of products. Vol. 1: Methodology, tools and case studies in product development - Vol. 2: Scientific background*; Chapman & Hall: London, U.K..
- HEIG-VD, (2012). ECO-BAT eco balance assessment tool. 09/01.
- Heijungs R., J.B. Guinée, G. Huppes, R.M. Lankreijer, H.A. Udo de Haes, A. Wegener Sleeswijk, A.M.M. Ansems, P.G. Eggels, R. van Duin, H.P. de Goede (1992a). *Environmental Life Cycle Assessment of Products; Guide*; Report Nr.9266, CML, Leiden.
- Heijungs R., J.B. Guinée, G. Huppes, R.M. Lankreijer, H.A. Udo de Haes, A.Wegener Sleeswijk, A.M.M. Ansems, P.G. Eggels, R. van Duin, H.P. de Goede (1992b). *Environmental Life Cycle Assessment of Products; Backgrounds*, Report Nr. 9267, CML, Leiden
- Heijungs, R. & Suh, S. (2002) *The computational structure of life cycle assessment*. Kluwer Academic Publishers (ISBN 1-4020-0672-1), Dordrecht, xii+241 pp.
- Heijungs, R., Settanni, E., & Guinée, J. (2013). Toward a computational structure for life cycle sustainability analysis: unifying LCA and LCC. *The international journal of life cycle assessment*, 18(9), 1722-1733.
- Heijungs, R.; de Koning, A.; Suh, S.; Huppes, G. (. 2006) Toward an information tool for integrated product policy: requirements for data and computation. *J. Ind. Ecol*, 10 (3), 147–158.
- Hellweg S, Demou E, Scheringer M , Mckone TE, Hungerbuhler K. (2005) Confronting workplace exposure to chemicals with LCA: examples of trichloroethylene and perchlorpethylene in metal degreasing and dry cleaning. *Environmental Science and Technology*; 19:7741–8.

- Hendrickson,C.;Lave,L.B.;Matthews, H.S. (2006) Environmental life cycle assessment of goods and services - An input-output approach; Resources for the Future: Washington, DC..
- Hertwich, E.G., Hammitt, J. A (2001) Decision-Analytic Framework for Impact Assessment. Part 2: Midpoints, Endpoints and Criteria for Method Development. International Journal of Life Cycle Assessment, 6(5), 265-272.
- Hofstetter P. (2002) User preferences for life-cycle decision support tools: evaluation of a survey of BEES Users, Environmental protection agency. Office of research and development, National Institute of Standards and Technology (US), United States.
- Hopkins, W. G.; Huñner, N. P. (2004) A.Introduction to Plant Physiology, 3rd ed; John Wiley & Sons, New York.
- Huberman N, Pearlmutter D. (2008) A life-cycle energy analysis of building materials in the Negev desert. Energy and Buildings 40..
- Huijbregts MAJ, Gilijamse W, Ragas AMJ, Reijnders L. (2003) Evaluating uncertainty in environmental life-cycle assessment. A case study comparing two insulation options for a Dutch one-family dwelling. Environmental Science and Technology; 11:2600–8.
- Hunkeler, D. ,Lichtenvort ,K., Rebitzer, G. (2008) Environmental Life Cycle Costing; Eds.; CRC Press: New York..
- Huppés, G.; van Rooijen, M.; Kleijn,R.; Heijungs, R.; de Koning, A.; van Oers, L. (2004) Life Cycle Costing and the Environment.: Institute of Environmental Sciences (CML), Universiteit Leiden: Leiden, The Netherlands.
- ICCT (2014) International Council on Clean Transportation "EU CO2 standards for passenger cars and light-commercial vehicles". Retrieved 2014-02-05 <http://www.theicct.org/eu-co2-standards-passenger-cars-and-lcvs> [última consulta 27 Setembro 2015].
- IEA Annex 31. (2001) Energy related environmental impact of buildings; [web page], <http://www.iisbe.org/annex31/index.html>
- IGRA – International Green Roof Association, Disponível em <http://www.igra-world.com/> [
- Iloäki A., Lützkendorf T. and Trinius W., (2008) "Sustainability assessment of buildings in CEN/TC350 "Sustainability of construction works"". SB08 - World Sustainable Building Conference, Melbourne, Australia..
- Iloäki A., Lützkendorf T. and Trinius W., (2008) "Sustainability assessment of buildings in CEN/TC350 "Sustainability of construction works"". Conference of Innovation on Sustainable Construction (Congresso de Inovação na Construção Sustentável) - CINCOS 08, Curia, Portugal: Sustainable Construction Platform, pp. 557-564.
- Imperialum (2013) Declaração Ambiental de Produto - Sistemas de Impermeabilização de Coberturas, com Membranas Betuminosas Totalmente Aderidas. <http://www.imperialum.com/cms/wp-content/uploads/2015/05/DECLARACAO-AMBIENTAL-DE-PRODUTO-IMPERALUM.pdf>
- Imperialum (2015) Documentos de aplicação <http://www.imperialum.com/qualidade-e-ambiente/documentos-da-aplicacao>
- Inventory of Carbon & Energy (ICE) Version 2.0 Prof. Geoff Hammond & Craig Jones Sustainable Energy Research Team (SERT) Department of Mechanical Engineering University of Bath, UK This project was joint funded under the Carbon Vision Buildings program by: <http://www.bath.ac.uk/> <http://web.mit.edu/2.813/www/readings/ICEv2.pdf>
- IPCC (2013) Summary for Policymakers. In: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, p.26.
- ISO 14020 (2000) Environmental Labels and Declarations -- General Principles.
- ISO 14021 (1999) Environmental Labels and Declarations -- Self-Declared Environmental Claims (Type II Environmental Labelling)

- ISO 14025 (2006) Environmental Labels And Declarations -- Type III Environmental Declarations -- Principles and Procedures.
- ISO 14040 (2006) Environmental management - Life cycle assessment - Principles and framework; International Organization for Standardization: Geneva, Switzerland.
- ISO 14044 (2006) Environmental management - Life cycle assessment - Requirements and guidelines; International Organization for Standardization: Geneva, Switzerland.
- ISO 15392 (2008) "Sustainability in building construction - General principles", International Organization for Standardization.
- ISO 15686-1:2000(E). Buildings and constructed assets – service life planning – Part 1: General principles. Geneva: ISO; 2000.
- ISO 15804 (2012) Sustainability of Construction Works - Environmental Product Declarations - Core Rules for the Product Category of Construction Products.
- ISO/TS 21929-1:2006(E). Sustainability in building construction – sustainability indicators – Part 1: framework for development of indicators for buildings. Geneva: ISO; 2006a.
- ISO/TS 21931-1:2006(E). Sustainability in building construction – framework for methods of assessment for environmental performance of construction works – Part 1: Buildings. Geneva: ISO; 2006b.
- .Itsubo, N. (2002) Impact Assessment based on the Damage of Safeguard Subjets. Indicators and Methodology for Human Health. Workshop Report. International Journal of Life Cycle Assessment, 7(3), 178.
- Jaffal, I. Ouldboukhitine, S. Belarbi, R. (2012) A comprehensive study of the impact of green roofs on building energy performance, Renewable Energy, volume 43 Elsevier,
- Jang, M., Hong, T., & Ji, C. (2015). Hybrid LCA model for assessing the embodied environmental impacts of buildings in South Korea. *Environmental Impact Assessment Review*, 50, 143-155.
- Jönsson Å. (2000) Is it feasible to address indoor climate issues in LCA? *Environmental Impact Assessment Review* 2000;2:241–59.
- Kellenberger D, Althaus H. (2009) Relevance of simplifications in LCA of building components. *Building and Environment*; 4:818–25.
- Kendall, A.; Chang, B.; Sharpe, B. (2009) Accounting for Time- Dependent Effects in Biofuel Life Cycle Greenhouse Gas Emissions Calculations. *Environ. Sci. Technol.*, 43 (18), 7142–7147.
- Kofoworola, O. F., & Gheewala, S. H. (2008). Environmental life cycle assessment of a commercial office building in Thailand. *The international journal of life cycle assessment*, 13(6), 498-511.
- Kohler N, Moffatt S. (2003) Life-cycle analysis of the built environment. *India Environment*;2-3:17–21.
- Koroneos C, Dompros (2007) A. Environmental assessment of brick production in Greece. *Building and Environment*;42.
- Kosareo, L., & Ries, R. (2007). Comparative environmental life cycle assessment of green roofs. *Building and Environment*, 42(7), 2606-2613. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2006.06.019>
- Kotaji S, Edwards S, Schuurmans A. (2003) Life cycle assessment in building and construction. A state-of-the-art report. Florida: SETAC press.
- Levasseur, A.; Lesage, P.; Margni, M.; Deschenes, L.; Samson, R. (2010) Considering Time in LCA: Dynamic LCA and Its Application to Global Warming Impact Assessments. *Environ. Sci. Technol.*, 44 (8), 3169–3174.

- Lindfors, L.-G.; Christiansen, K.; Hoffman, L.; Virtanen, Y.; Juntilla, V.; Hanssen, O. J.; Rønning, A.; Ekvall, T.; Finnveden, G. (1995) Nordic Guidelines on Life-Cycle Assessment, Nord 1995:20; Nordic Council of Ministers: Copenhagen, Denmark..
- Liu, K. Baskaran, B. (2003) Thermal performance of green roofs through field evaluation. Proceedings of the First Annual International Green Roofs Conference: Greening Rooftops for Sustainable Communities. Chicago, USA.
- Machado, A. (2009) "From energetic efficiency to carbon efficiency! (in Portuguese)". *Vida Imobiliária* (141). p. 3.
- Martens, R. Bass, B. (2006) Roof-envelope ratio impact on green roof energy performance. Proceedings of the Fourth Annual International Green Roofs Conference: Greening Rooftops for Sustainable Communities. Boston, USA.
- Milne G., Reardon C. (2013) Materials: Embodied energy, Updated 2013 <http://www.yourhome.gov.au/materials/embodied-energy>
- Mithraratne, N., & Vale, B. (2004). Life cycle analysis model for New Zealand houses. *Building and Environment*, 39(4), 483-492
- Morgado, J. (2012) Plano de inspeção e manutenção de coberturas de edifícios correntes. Dissertação para obtenção de grau de Mestre em Engenharia Civil. Universidade Técnica de Lisboa, Instituto Superior Técnico. Lisboa, Portugal.
- Nebel B., Zimmer B, Wegener G. (2006) Life cycle assessment of wood floor coverings. A Representative study for the German flooring industry. *International Journal of Life Cycle Assessment*; 11(3).
- Nemry, F., Uihlein, A., Colodel, C. M., Wetzels, C., Braune, A., Wittstock, B., Niemeier, S. (2010). Options to reduce the environmental impacts of residential buildings in the European Union—Potential and costs. *Energy and Buildings*, 42(7), 976-984.
- Niachou A, Papakonstantinou K, Santamouris M, Tsangrassoulis A, Mihalakakou G. (2001) Analysis of the green roof thermal properties and investigation of its energy performance. *Energy and Buildings*; 33(7).
- Nicoletti GM, Notarnicola B, Tassielli G. (2002) Comparative Life Cycle Assessment of flooring materials: ceramic versus marble tiles. *Journal of Cleaner Production*; 10(3).
- Nishioka, Y.; Levy, J. I.; Norris, G. A. (2006) Integrating air pollution, climate change, and economics in a risk-based life-cycle analysis: a case study of residential insulation. *Hum. Ecol. Risk Assess*, 12 (3), 552–571.
- Norris GA, Yost P. (2001) A transparent, interactive software environment for communicating life-cycle assessment results: an application to residential windows. *Journal of Industrial Ecology*; 4:15–28.
- O'Brien E, Guy B, Lindner AS. (2006) Life cycle analysis of the deconstruction of military barracks: Ft. McClellan, Anniston, AL. *Journal of Green Building*; 4:166–83.
- Ochoa Franco L. (2004) Life cycle assessment of residential buildings. Digital dissertations, Colorado State University Libraries (UMI 3161658).
- Ortiz, O., Castells, F., & Sonnemann, G. (2009). Sustainability in the construction industry: A review of recent developments based on LCA. *Construction and Building Materials*, 23(1), 28-39.
- Ortiz, O., Pasqualino, J., & Castells, F. (2010). Environmental performance of construction waste: comparing three scenarios from a case study in Catalonia, Spain. *Waste Management*, 30(4), 646-654.
- Ottelé, M., Perini, K., Fraaij, A., Haas, E., & Raiteri, R. (2011). Comparative life cycle analysis for green façades and living wall systems. *Energy and Buildings*, 43(12), 3419-3429.
- PCR (2014) Product Category Rules according to ISO 14025 Flexible sheets for waterproofing - bitumen , plastic or rubber sheets for roof waterproofing.

- PCR (2015) Product Category Rules according to ISO 14025 Product group classification: Multiple UN CPC codes construction products and construction services.
- PDM (2012) Plano Diretor Municipal de Lisboa, publicado em 30 de agosto de 2012, <http://pdm.cm-lisboa.pt/> [última consulta 27 Setembro 2015].
- PE Int'l, GaBi (2013) GaBi 6: Software-System and Databases for Life Cycle Engineering. Copyright, TM. Stuttgart, Echterdigen. 1992-2013
- PE Int'l, GaBi (2013) PE INTERNATIONAL AG; LBP-GABI, University of Stuttgart: GABI Software System, Leinfelden-Echterdingen / Germany
- PE Int'l, GaBi (2014) GaBi Database & Modelling Principles 2014, PE INTERNATIONAL AG ,Version 1.0, November 2014 http://www.gabi-software.com/fileadmin/gabi/Modelling_Principles/GaBi_Modelling_Principles_2014.pdf
- Peck, S. e Kuhn, M. (2000) Design Guidelines for Green Roofs, Environment Canada, Toronto, Canada.
- Pehnt, M. (2006) Dynamic life cycle assessment (LCA) of renewable energy technologies. *Renewable Energy*, 31 (1), 55–71.
- Pérez G, Vila A, Rincón L, Solé C, Cabeza LF. (2012) Use of rubber crumbs as drainage layer in green roofs as potential energy improvement material. *Applied Energy* ;97:347–354.
- Petersen AK, Solberg B. (2005) Environmental and economic impacts of substitution between wood products and alternative materials: a review of micro-level analyses from Norway and Sweden. *Forest Policy and Economics*; 7..
- Pina dos Santos, C. Matias, L. (2006) Coeficientes de Transmissão Térmica de Elementos da Envolvente dos Edifícios, ITE 50, LNEC, Lisboa
- PRé Consultants, SimaPro. Amersfoort, The Netherlands.
- Ramesh, T., Prakash, R., & Shukla, K. (2010). Life cycle energy analysis of buildings: An overview. *Energy and Buildings*, 42(10), 1592-1600.
- Raposo, F. (2013) Manual de Boas Práticas de Coberturas Verdes: Análise de casos de estudo, Dissertação para a obtenção do Grau de Mestre em Construção e Reabilitação, Instituto Superior Técnico, Lisboa.
- RCCTE (2006) DL 80/2006 Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios.
- REH (2013) DL 118/2013 Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Habitação.
- Reijnders L, van Roekel A. (1999) Comprehensive and adequacy of tools for the environmental improvement of buildings. *J Clean Prod*;7:221–5.
- Ristimäki, M., Säynäjoki, A., Heinonen, J., & Junnila, S. (2013). Combining life cycle costing and life cycle assessment for an analysis of a new residential district energy system design. *Energy*, 63(0), 168-179.
- Rocha e Silva, M. (2014) Simulação Energética de Coberturas Verdes, Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico, Lisboa.
- Rodrigues, A. (2013) Abordagem exigencial no processo construtivo - Aplicação aos Edifícios, Documentação da disciplina de PRE no âmbito do Mestrado em Construção e Reabilitação, Instituto Superior Técnico, Lisboa.
- Rosselló-Batle, B., Moia, A., Cladera, A., & Martínez, V. (2010). Energy use, CO2 emissions and waste throughout the life cycle of a sample of hotels in the Balearic Islands. *Energy and Buildings*, 42(4), 547-558.
- Sailor, D. J. (2008). A green roof model for building energy simulation programs. *Energy and buildings*, 40(8), 1466-1478.

- Saiz S, Kennedy C, Bass B, Pressnail K. (2006) Comparative life cycle assessment of standard and green roofs. *Environmental Science & Technology* ;40 (13):4312e6.
- Santamouris, M., Pavlou, C., Doukas, P., Mihalakakou, G., Synnefa, A., Hatzibiros, A., & Patargias, P. (2007). Investigating and analysing the energy and environmental performance of an experimental green roof system installed in a nursery school building in Athens, Greece. *Energy*, 32(9), 1781-1788.
- Santero, N. J., Masanet, E., & Horvath, A. (2011). Life-cycle assessment of pavements. Part I: Critical review. *Resources, Conservation and Recycling*, 55(9), 801-809.
- Saouter, E.; Feijtel, T.C.J. (2000) Use of lifecycle analysis and environmental risk assessment in an integrated product assessment. *Environmental Strategies. In Risk Assessment and Life Cycle Assessment; TemaNord 2000:545; Hauschild, M., Olsen, S. I., Poll, C., Bro-Rasmussen, F., Eds.; Nordic Council of Ministers: Copenhagen, Denmark.*
- Sartori I, Hestnes AG. (2007) Energy use in the life-cycle of conventional and low-energy buildings: a review article. *Energy and Buildings*; 39:249e57.
- Seppälä, J., Hämmäläinen, R.P. (2001) On the meaning of the Distance-to-Target Weighting Method and Normalisation in Life Cycle Assessment. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 6(4), 218-221.
- Sharma, A., Saxena, A., Sethi, M., & Shree, V. (2011). Life cycle assessment of buildings: a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(1), 871-875.
- Sherif, Y.S.; Kolarik, W.J. (1981) Life cycle costing: concept and practice. *OMEGA: Int. J. Manage. Serv.*, 9 (3), 287–296.
- Shukla A, Tiwari GN, Sodha MS. (2009) Embodied energy analysis of adobe house. *Renewable Energy*; 34(3):755e61.
- Silvestre, J. D. (2013) Environmental, energetic and economic life-cycle assessment from “cradle to cradle”(3E-C2C) of buildings assemblies. IST, Technical University of Lisbon http://www.irbnet.de/daten/iconda/CIB_DC23311.pdf
- Silvestre, J. D., de Brito, J., & Pinheiro, M. D. (2013). From the new European Standards to an environmental, energy and economic assessment of building assemblies from cradle-to-cradle (3E-C2C). *Energy and Buildings*, 64, 199-208.
- Silvestre, J., de Brito, J., & Pinheiro, M. (2010). Building's external walls in Life-Cycle Assessment (LCA) research studies Portugal SB10. *Sustainable Building Affordable to All, Vilamoura, Portugal* (pp. 629-638).
- Singh A, Berghorn G, Joshi S, Syal M. (2011) Review of life-cycle assessment applications in building construction. *Journal of Architectural Engineering*;1:15–23.
- Sonis, M.; Oosterhaven, J.; Hewings, G. J. D. (1993) Spatial Economic Structure and Structural Changes in the EC: Feedback Loop Input-Output Analysis. *Econ. Syst. Res.*, 5 (2), 173–184.
- Sonnemann, G.; Castells, F.; Schuhmacher, M. (2004) *Integrated life-cycle and risk assessment for industrial processes*; Lewis Publishers: Boca Raton, FL.
- Spatari S, Young S. (2000) Life cycle tools and databases for building technology. In: 2000 Annual conference Abstracts—Canadian Society for Civil Engineering; 98.
- Suh, S.; Lenzen, M.; Treloar, G. J.; Hondo, H.; Horvath, A.; Huppes, G.; Joliet, O.; Klann, U.; Krewitt, W.; Moriguchi, Y.; Munksgaard, J.; Norris, G. (2004) System boundary selection in life-cycle inventories using hybrid approaches. *Environ.Sci.Technol.*, 38 (3), 657–664.
- Ecoinvent data v2.1, The Ecoinvent Center. A competence centre of ETH; PSI; Empa & ART. <http://www.ecoinvent.ch/>. [última consulta 29 Setembro 2015].
- Thormark C. (2002) A low energy building in a life cycle e its embodied energy, energy need for operation and recycling potential. *Building and Environment*; 37.

- Tolderlund, L. (2010) Design Guidelines and Maintenance Manual for Green Roofs in the Semi-Arid and Arid West, University of Colorado, Denver, USA.
- Treloar, G. J., Love, P. E. D., Faniran, O. O., & Iyer-Raniga, U. (2000). A hybrid life cycle assessment method for construction. *Construction Management & Economics*, 18(1), 5-9.
- Trusty W, Horst S. (2005) LCA tools around the world. *Building Design and Construction*: 12–6.
- Trusty, W.B. (2000) Introducing assessment tool classification system. *Advanced Building Newsletter*; 25: p.18. [web page], <http://aesl.hyu.ac.kr/resource/blcc/assess-typology-tool.pdf>
- UN Environment Programme Life Cycle Initiative website. <http://www.lifecycleinitiative.org/>
- University of Sydney (2010) Balancing Act - A Triple Bottom Line Analysis of the Australian Economy. Available at <http://www.cse.csiro.au/publications/2005/balancingact1.pdf>
- Valadas, A. (2014) Avaliação Experimental do Comportamento Térmico de Coberturas Verdes, Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico, Lisboa.
- Vigon, B.W.; Tolle, D.A.; Cornaby, B.W.; Latham, H.C.; Harrison, C.L.; Boguski, T.L.; Hunt, R.G.; Sellers, J.D. (1993) Life-cycle assessment. Inventory guidelines and principles. EPA, Cincinnati
- Weidema, B. (2000) Avoiding Co-Product Allocation in Life-Cycle Assessment. *J. Ind. Ecol.*, 4 (3), 11–33.
- Weidema, B. P.; Frees, N.; Nielsen, P. (1999) Marginal production technologies for life cycle inventories. *Int. J. Life Cycle Assess.*, 4 (1), 48–56.
- Werner, F., & Richter, K. (2007). Wooden building products in comparative LCA. *The international journal of life cycle assessment*, 12(7), 470-479.
- Werthmann, C. (2007) Green roof: a case study – Design by Michel Van Valkenburgh Associates for the headquarters of the American Society of Landscape Architects. Princeton Architectural Press. New York, USA.
- Wong, N. Chen, Y. Ong C.L. Sia A. (2003) Investigation of thermal benefits of rooftop garden in the tropical environment, *Building and Environment*, volume 38 (2). Elsevier, 2003b. pp. 261-270.
- Wong, N. H., Tay, S. F., Wong, R., Ong, C. L., & Sia, A. (2003). Life cycle cost analysis of rooftop gardens in Singapore. *Building and Environment*, 38(3), 499-509.
- Xing S, Xu Z, Jun G. (2008) Inventory analysis of LCA on steel- and concrete construction office buildings. *Energy and Buildings*;40:1188e93.
- Zabalza Bribián, I., Aranda Usón, A., & Scarpellini, S. (2009). Life cycle assessment in buildings: State-of-the-art and simplified LCA methodology as a complement for building certification. *Building and Environment*, 44(12), 2510-2520.
- Zabalza Bribián, I., Valero Capilla, A., & Aranda Usón, A. (2011). Life cycle assessment of building materials: comparative analysis of energy and environmental impacts and evaluation of the eco-efficiency improvement potential. *Building and Environment*, 46(5), 1133-1140.
- Zamagni, A., P. Buttol, P.L. Porta, R. Buonamici, P. Masoni, J. Guinée, R. Heijungs, T. Ekvall, R. Bersani, A. Bieńkowska and U. Pretato. (2008) Critical review of the current research needs and limitations related to ISO-LCA practice. Deliverable D7 of work package 5 of the CALCAS project. ENEA, The Italian National Agency on new Technologies, Energy and the Environment 106p.
- Zamagni, A.; Buonamici, R.; Buttol, P.; Porta, P. L.; Masoni, P. (2009) Main R&D lines to improve reliability, significance and usability of standardized LCA; Deliverable 14 of the CALCAS project, Available at <http://www.estis.net/sites/calcas/>

Zamagni,A.; Buttol,P.; Buonamici,R.; Masoni,P.; Guine'e,J.B.; Huppel, G.; Heijungs, R.; van der Voet, E.; Ekvall, T.; Rydberg, T. (2009) Blue Paper on Life Cycle Sustainability Analysis; Deliverable 20 of the CALCAS project, Available at <http://www.estis.net/sites/calcas/>

ZinCo® (2014) System Solutions for Extensive Green Roofs, Planning Guide, Germany. Disponível em: http://www.zinco-greenroof.com/EN/downloads/pdfs/ZinCo_Extensive_Green_Roofs.pdf [última consulta 29 Setembro 2015].

A. ANEXOS

A1. Quadro-síntese de estudos de LCA (e non LCA- based) publicados e aplicados no sector da construção de edifícios em coberturas verdes extensivas.

A2. Indicadores da Declaração Ambiental de Produto - Sistemas de Impermeabilização de Coberturas, com Membranas Betuminosas Totalmente Aderidas, (Imperialum, 2013).

A3. Resultados da LCIA: Diagramas GaBi: Cobertura verde extensiva (Indicadores das categorias de impacte - Análise de processos).

A1. Quadro-síntese de estudos de ACV (e non LCA- based) publicados e aplicados no sector da construção de edifícios em coberturas verdes extensivas.

Tabela A.1 - Quadro-síntese de estudos de ACV (e non LCA- based) publicados e aplicados no sector da construção de edifícios em coberturas verdes extensivas

Referência	Conteúdo	País	Ano	Âmbito dos indicadores	Objetivos	Critérios	Métodos	Impactos ambientais analisados										
								GW	A	E	OD	HT	EL	WC	DA	W	EC	RS
Arcas Baena	Estudi d'anàlisi de cicle de vida de cubicles amb coberta vegetada	Espanha	2012	Ambiental	Minimizar os efeitos negativos para o ambiente.	Impactos ambientais, conservação da energia e preservação ambiental (Limitação dos consumos nominais de aquecimento e arrefecimento).	LCA	x	x	x	x				x		x	x
Bianchini et al.	How "green" are the green roofs? Lifecycle analysis of green roof materials.	Canadá	2012	Ambiental	Minimizar os efeitos negativos para o ambiente.	Impactos ambientais, conservação da energia e preservação ambiental (Limitação dos consumos nominais de aquecimento e arrefecimento).	LCA											
Blackhurst et al.	Cost-effectiveness of green roofs.	EUA	2010	Ambiental Económico Social	Minimizar os efeitos negativos para o ambiente.	Impactos ambientais, conservação da energia e preservação ambiental (Limitação dos consumos nominais de aquecimento e arrefecimento).	EIO-LCA (Economic-input output life-cycle assessment); Electricity emissions factor of 1.5 lb. CO ₂ e/kWh											
Carler & Keeler	Life-cycle cost-benefit analysis of extensive vegetated roof systems.	EUA	2008	Ambiental Económico	Minimizar os efeitos negativos para o ambiente.	Impactos ambientais, conservação da energia e preservação ambiental	BCA Life-cycle cost-benefit analysis (8-stage framework, Hanley and Spash (1993)). net present value (NPV)											
Castleon et al.	Green roofs: building energy savings and the potential for retrofit	Reino Unido	2010	Ambiental	Minimizar consumo de energia térmica (Conforto térmico)	Limitação dos consumos nominais de aquecimento e arrefecimento : NIC ≤ sNI (Inverno); NVC ≤ sNV (Verão).	Modelos de simulação térmica, incluindo opção Ecoroof desenvolvida pela ferramenta Energy-Plus por Sailor (2008).											
Getter et al.	Carbon sequestration potential of extensive green roofs.	EUA	2009	Ambiental	Minimizar os efeitos negativos para o ambiente.	Impactos ambientais.	Simulação experimental											
Jaffal et al.	A comprehensive study of the impact of green roofs on building energy performance	França	2012	Ambiental	Minimizar consumo de energia térmica (Conforto térmico)	Limitação dos consumos nominais de aquecimento e arrefecimento : NIC ≤ sNI (Inverno); NVC ≤ sNV (Verão).	Modelo de simulação térmica desenvolvido por Sailor (2008), baseado no trabalho de Frankenstein and Koenig (2004).											
Kosareo et al.	Comparative environmental life cycle assessment of green roofs	EUA	2006	Ambiental	Minimizar os efeitos negativos para o ambiente.	Impactos ambientais, conservação da energia e preservação ambiental (Limitação dos consumos nominais de aquecimento e arrefecimento).	LCA											
Niachou et al.	Analysis of the green roof thermal properties and investigation of its energy performance	Grécia	2001	Ambiental	Minimizar consumo de energia térmica (Conforto térmico)	Limitação dos consumos nominais de aquecimento e arrefecimento : NIC ≤ sNI (Inverno); NVC ≤ sNV (Verão).	Simulação experimental; Modelo matemático de simulação térmica.											
Ottel et al.	Comparative life cycle analysis for green façades and living wall systems.	Holanda	2011	Ambiental	Minimizar os efeitos negativos para o ambiente.	Impactos ambientais, conservação da energia e preservação ambiental (Limitação dos consumos nominais de aquecimento e arrefecimento).	LCA											
Pérez et al.	Use of rubber crumbs as drainage layer in green roofs as potential energy improvement material	Espanha	2012	Ambiental	Minimizar consumo de energia térmica (Conforto térmico)	Limitação dos consumos nominais de aquecimento e arrefecimento : NIC ≤ sNI (Inverno); NVC ≤ sNV (Verão).	Simulação experimental.											
Rocha e Silva	Simulação energética de coberturas verdes.	Portugal	2014		Minimizar consumo de energia térmica (Conforto térmico)	Limitação dos consumos nominais de aquecimento e arrefecimento.	Modelo matemático de simulação térmica; programa computacional de simulação energética EnergyPlus, que possui um modelo de coberturas verdes desenvolvido por Sailor (2008).											
Sailor	A green roof model for building energy simulation programs.	EUA	2008	Ambiental	Minimizar consumo de energia térmica (Conforto térmico)	Limitação dos consumos nominais de aquecimento e arrefecimento : NIC ≤ sNI (Inverno); NVC ≤ sNV (Verão).	Um modelo baseado fisicamente do balanço energético de uma cobertura verde foi desenvolvido e integrado no programa de simulação energético de edifícios EnergyPlus.											
Saiz et al.	Comparative life cycle assessment of standard and green roofs	Espanha	2006	Ambiental	Minimizar os efeitos negativos para o ambiente.	Impactos ambientais, conservação da energia e preservação ambiental (Limitação dos consumos nominais de aquecimento e arrefecimento).	LCA	x	x	x	x	x			x			x
Santamouris et al.	Investigating and analysing the energy and environmental performance of an experimental green roof system installed in a nursery school building in Athens, Greece.	Grécia	2007	Ambiental	Minimizar consumo de energia térmica (Conforto térmico)	Limitação dos consumos nominais de aquecimento e arrefecimento.	Simulação experimental; Modelo matemático de simulação térmica.											
Valadas	Avaliação experimental do comportamento térmico de coberturas verdes.	Portugal	2014		Minimizar consumo de energia térmica (Conforto térmico)	Limitação dos consumos nominais de aquecimento e arrefecimento.	Simulação experimental; monitorização efetuadas por Valadas (2014) em três edifícios localizados em Lisboa com coberturas verdes.											
Wong et al.	Life cycle cost analysis of rooftop gardens in Singapore.	Singapura	2003	Económico	Minimizar custos globais (incorporando custos de energia em custos de ciclo de vida).	Limitação dos consumos nominais de aquecimento e arrefecimento; Minimizar Custos de investimento; Custos de exploração; Custos de manutenção; Custos de reabilitação ou beneficiação; Custos de demolição, reutilização e reciclagem; Custo global atualizado	LCC; Modelo de simulação térmica											

Abreviações: GW, potencial de aquecimento global; OD, criação fotoquímica de ozono; WC, consumo de água; DA, depleção de recursos abióticos; A, acidificação; HT, toxicidade humana; W, criação de resíduos; CE, ecotoxicidade; E, eutrofização; EL, o consumo de energia; RS, o consumo de recursos; AR, emissões atmosféricas.

A2. Indicadores da Declaração Ambiental de Produto - Sistemas de Impermeabilização de Coberturas, com Membranas Betuminosas Totalmente Aderidas, (Imperialum, 2013).

Tabela A.2 - Indicadores ambientais,; Declaração Ambiental de Produto - Sistemas de Impermeabilização de Coberturas, com Membranas Betuminosas Totalmente Aderidas, (Imperialum, 2013).

	Nome do indicador	Unidade	Fontes	EPD
Indicadores de impacto ambiental	Potencial de aquecimento global, fóssil GWP ₁₀₀ ;	g CO ₂ equiv	IPCC 2007	Declarado
	Potencial de destruição da camada de ozono estratosférica, ODP;	g CFC 11 equiv	CML	Declarado
	Potencial de acidificação do ar e da água, AP;	g SO ₂ equiv	CML	Declarado
	Potencial de eutroficação, EP;	g (PO ₄) ³⁻ equiv	CML	Declarado
	Potencial de formação de oxidantes fotoquímicos do ozono troposférico, POCP;	g Eteno equiv	CML	Declarado
	Potencial de destruição abiótica (Elementos ADP) para recursos não fósseis;	g Sb equiv	CML	Declarado
	Potencial de destruição abiótica (Combustível fóssil ADP) para recursos fósseis;	MJ	Valor calorífico mais elevado	Declarado parcialmente nos indicadores energéticos
Indicadores de utilização de recursos	Uso de energia primária renovável excluindo fontes de energia primária renovável utilizadas como matérias-primas,	MJ	Valor calorífico mais elevado	Declarado
	Uso de fontes de energia primária renovável utilizadas como matérias-primas;	MJ	Valor calorífico mais elevado	Declarado
	Uso total de fontes de energia primária renovável (energia primária e fontes de energia primária utilizadas como matérias-primas);	MJ	Valor calorífico mais elevado	Declarado
	Uso de energia primária não-renovável excluindo fontes de energia primária não-renovável utilizadas como matérias-primas;	MJ	Valor calorífico mais elevado	Declarado e separado nas principais contribuições
	Uso de fontes de energia primária não-renovável utilizadas como matérias-primas;	MJ	Valor calorífico mais elevado	Declarado
	Uso total de fontes de energia primária não-renovável (energia primária e fontes de energia primária utilizadas como matérias-primas);	MJ	Valor calorífico mais elevado	Declarado
	Uso de materiais secundários;	g		Declarado
	Uso de combustíveis secundários renováveis;	g		Não aplicável
	Uso de combustíveis secundários não-renováveis;	g		Não aplicável
	Uso de água potável;	litros		Declarado
Indicadores de resíduos	Resíduos perigosos eliminados;	g		Declarado
	Resíduos não perigosos eliminados;	g		Declarado
	Resíduos radioactivos eliminados;	g		Considerado nos resíduos perigosos
Indicadores de fluxos de saída	Componentes para reutilização;	g		Não aplicável
	Materiais para reciclagem;	g		Declarado
	Materiais para recuperação de energia (excluindo incineração de resíduos);	g		Declarado
	Energia exportada;	MJ		Não aplicável

Tabela A.3 - Indicadores de impacto ambiental da Declaração Ambiental de Produto - Sistemas de Impermeabilização de Coberturas, com Membranas Betuminosas Totalmente Aderidas, (Imperialum, 2013).

	<i>Sistema monocamada</i>				<i>Sistema multicamada</i>			
	<i>M</i>	<i>P</i>	<i>J</i>	<i>Total</i>	<i>M</i>	<i>P</i>	<i>J</i>	<i>Total</i>
<i>Potencial de aquecimento global (g CO2 equiv)</i>	34,21	6,59	243,64	284,44	44,25	12,26	232,09	288,60
<i>Potencial de destruição de ozono (g CFC 11 equiv)</i>	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
<i>Potencial de acidificação (g SO2 equiv)</i>	0,15	0,02	0,50	0,66	0,21	0,03	0,44	0,68
<i>Potencial de eutroficação (g PO4⁻⁻⁻ equiv)</i>	0,02	0,004	1,15	1,18	0,02	0,005	1,25	1,28
<i>Potencial criação ozono fotoquímico (g Eteno equiv)</i>	0,03	0,01	0,11	0,14	0,05	0,01	0,12	0,18

M = Montante, P = Principal, J = Jusante

Tabela A.4 - Indicadores de recursos da Declaração Ambiental de Produto - Sistemas de Impermeabilização de Coberturas, com Membranas Betuminosas Totalmente Aderidas, (Imperialum, 2013).

		<i>Sistema monocamada</i>				<i>Sistema multicamada</i>			
		<i>M</i>	<i>P</i>	<i>J</i>	<i>Total</i>	<i>M</i>	<i>P</i>	<i>J</i>	<i>Total</i>
<i>Materiais</i>	<i>Biomassa (MJ)</i>	<0,01	<0,01	0,01	0,01	<0,01	<0,01	0,01	0,01
	<i>Recursos não renováveis (MJ)</i>	1,71	0,01	4,04	5,76	2,69	0,01	3,25	5,95
	<i>Potencial de destruição abiótico (g Sb eq.)</i>	1,7E-04	5,7E-06	4,2E-04	6,0E-04	3,0E-04	8,7E-06	6,5E-04	9,7E-04
	<i>Uso de materiais secundários (g)</i>	0,00	1,82	4,30	6,12	0,00	2,54	3,36	5,90
<i>Energia</i>	<i>Renovável (MJ)</i>	0,06	0,04	0,23	0,33	0,06	0,06	0,14	0,26
	<i>Petróleo (MJ)</i>	0,22	0,03	1,07	1,32	0,35	0,05	1,39	1,79
	<i>Gás (MJ)</i>	0,17	0,04	0,53	0,74	0,24	0,07	0,41	0,72
	<i>Carvão (MJ)</i>	0,16	0,03	0,50	0,69	0,19	0,07	0,38	0,64
	<i>Água (líter)</i>	0,20	0,03	0,69	0,91	0,30	0,05	0,63	0,98
	<i>Electricidade directa (kWh)</i>	0,00	<0,01	<0,01	0,01	0,00	<0,01	<0,01	0,02

M = Montante, P = Principal, J = Jusante

Tabela A.5 - Indicadores de resíduos da Declaração Ambiental de Produto - Sistemas de Impermeabilização de Coberturas, com Membranas Betuminosas Totalmente Aderidas, (Imperialum, 2013).

	<i>Sistema monocamada</i>				<i>Sistema multicamada</i>			
	<i>M</i>	<i>P</i>	<i>J</i>	<i>Total</i>	<i>M</i>	<i>P</i>	<i>J</i>	<i>Total</i>
<i>Perigosos para aterro [g]</i>	0,21	0,01	0,52	0,75	0,22	0,02	0,29	0,53
<i>Não perigosos para aterro [g]</i>	2,22	0,62	154,44	157,28	2,57	1,44	166,97	170,99
<i>Para incineração [g]</i>	0,00	0,28	47,55	47,83	0,00	0,38	54,58	54,97
<i>Para reciclagem [g]</i>	0,00	0,22	15,22	15,44	0,00	0,85	17,47	18,32

M = Montante, P = Principal, J = Jusante

A3. Resultados da LCIA: Diagramas GaBi: Cobertura verde extensiva (Indicadores das categorias de impacte - Análise de processos).

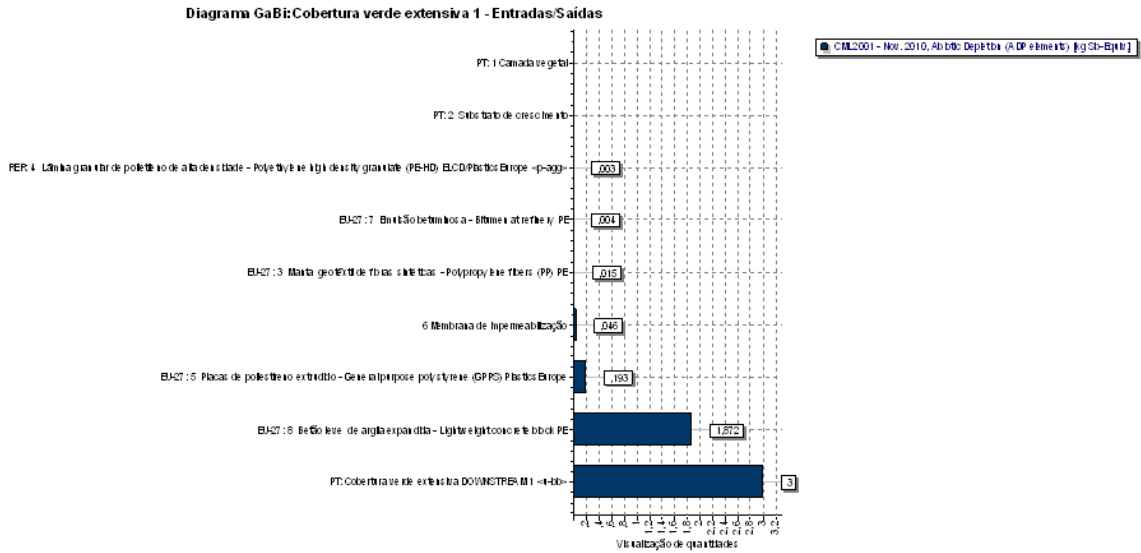


Figura A.1 - CML2001 - Nov. 2010, Abiotic Depletion (ADP elements) [kg Sb-Equiv.], cobertura verde extensiva. (PE Int'l, GaBi. 2014).

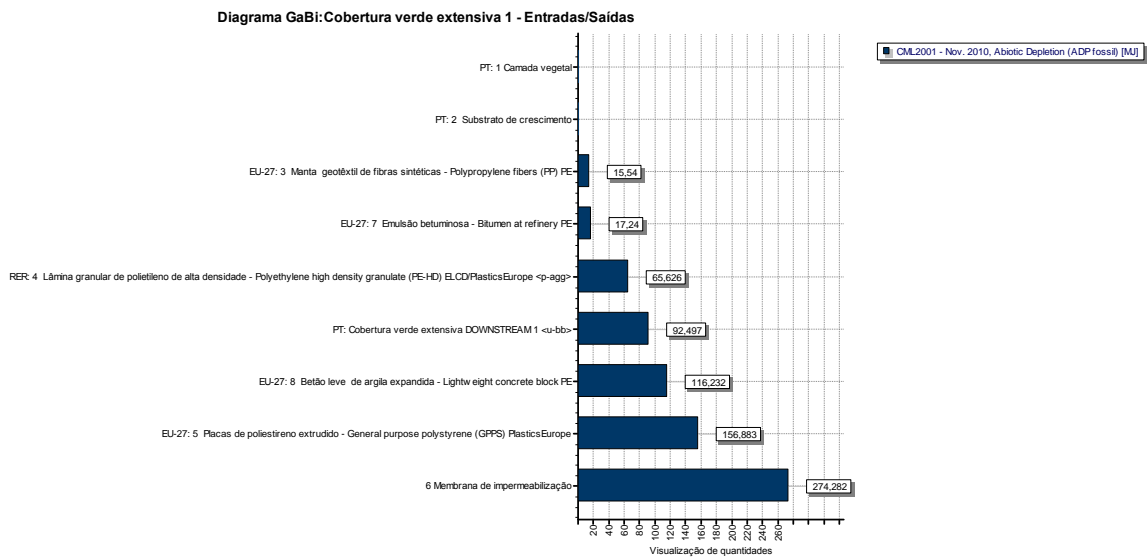


Figura A.2 - CML2001 - Nov. 2010, Abiotic Depletion (ADP fossil) [MJ], cobertura verde extensiva (PE Int'l, GaBi. 2014).

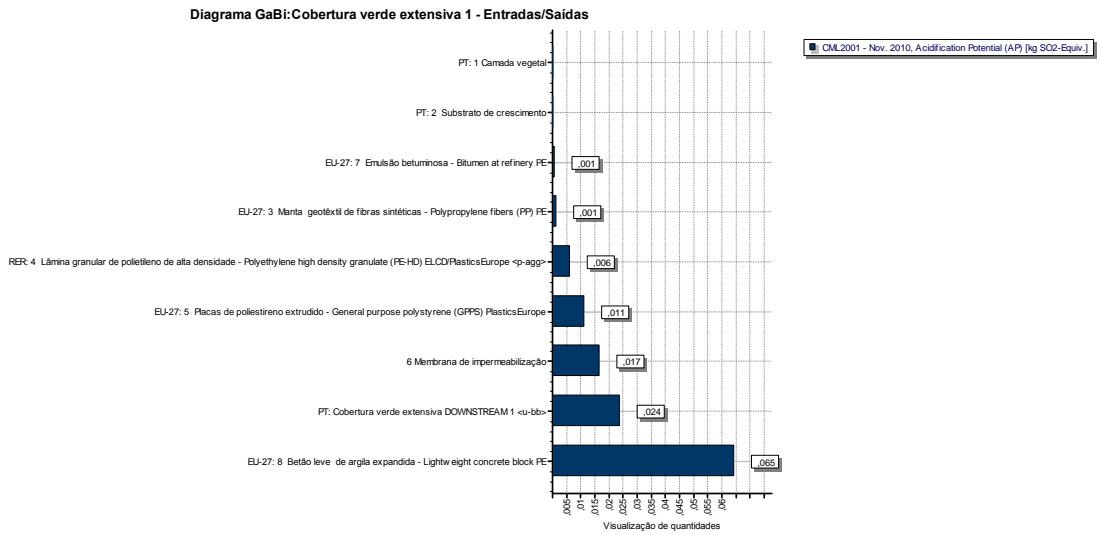


Figura A.3 - CML2001 - Nov. 2010, Acidification Potential (AP) [kg SO2-Equiv.], cobertura verde extensiva, (PE Int'l, GaBi. 2014).

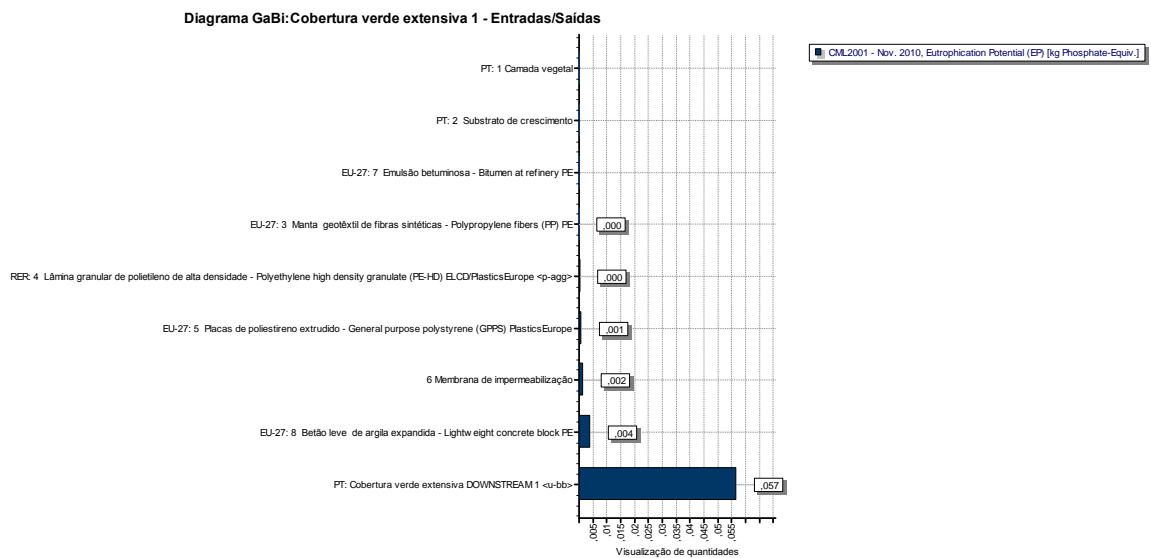


Figura A.4 - CML2001 - Nov. 2010, Eutrophication Potential (EP) [kg Phosphate-Equiv.], cobertura verde extensiva, (PE Int'l, GaBi. 2014).

Diagrama GaBi: Cobertura verde extensiva 1 - Entradas/Saídas

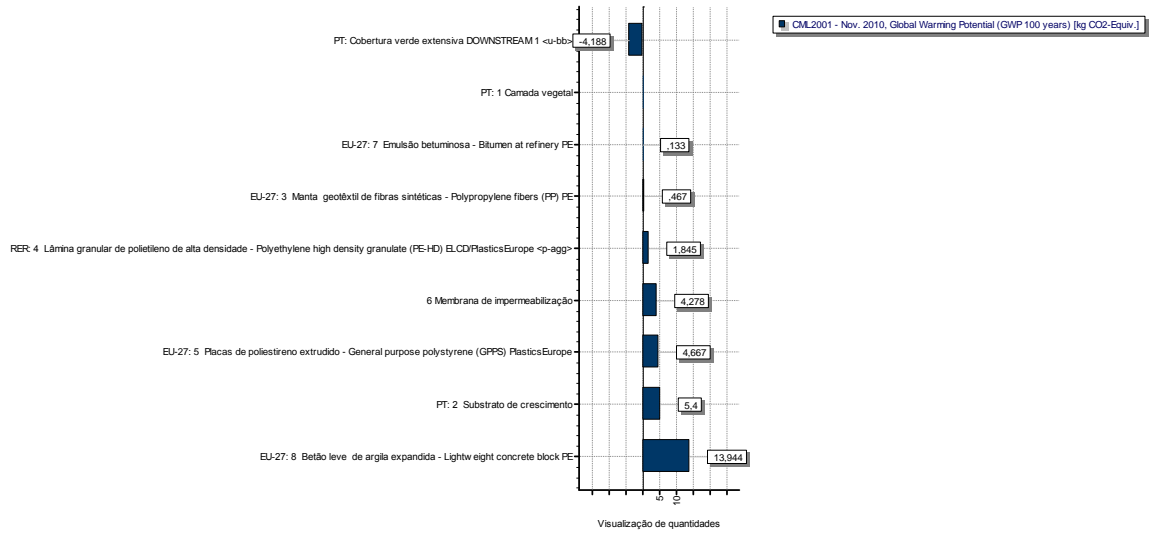


Figura A.5 - CML2001 - Nov. 2010, Global Warming Potential (GWP 100 years) [kg CO2-Equiv.], cobertura verde extensiva, (PE Int'l, GaBi. 2014).

Diagrama GaBi: Cobertura verde extensiva 1 - Entradas/Saídas

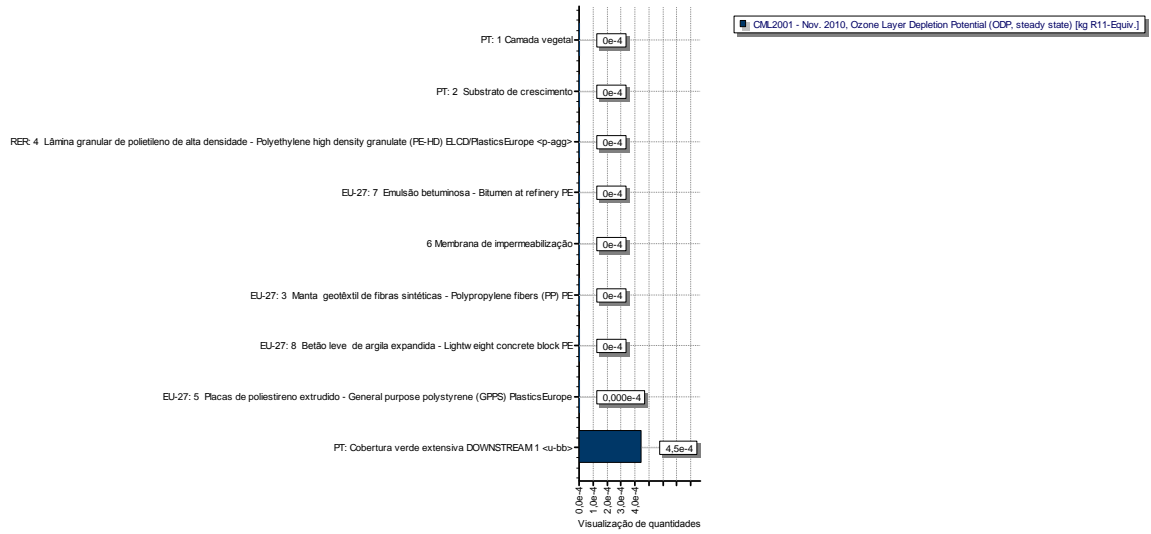


Figura A.6 - CML2001 - Nov. 2010, Ozone Layer Depletion Potential (ODP, steady state) [kg R11-Equiv.], cobertura verde extensiva, (PE Int'l, GaBi. 2014).

Diagrama GaBi: Cobertura verde extensiva 1 - Entradas/Saídas

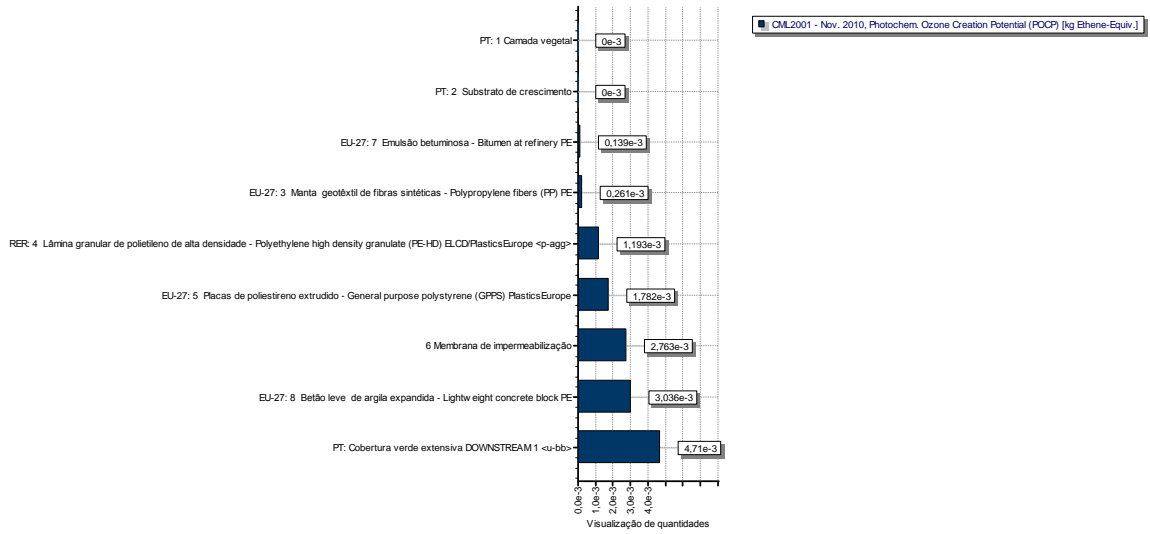


Figura A.7 - CML2001 - Nov. 2010, Photochem. Ozone Creation Potential (POCP) [kg Ethene-Equiv.], cobertura verde extensiva,

(PE Int'l, GaBi. 2014).

Diagrama GaBi: Cobertura verde extensiva 1 - Entradas/Saídas

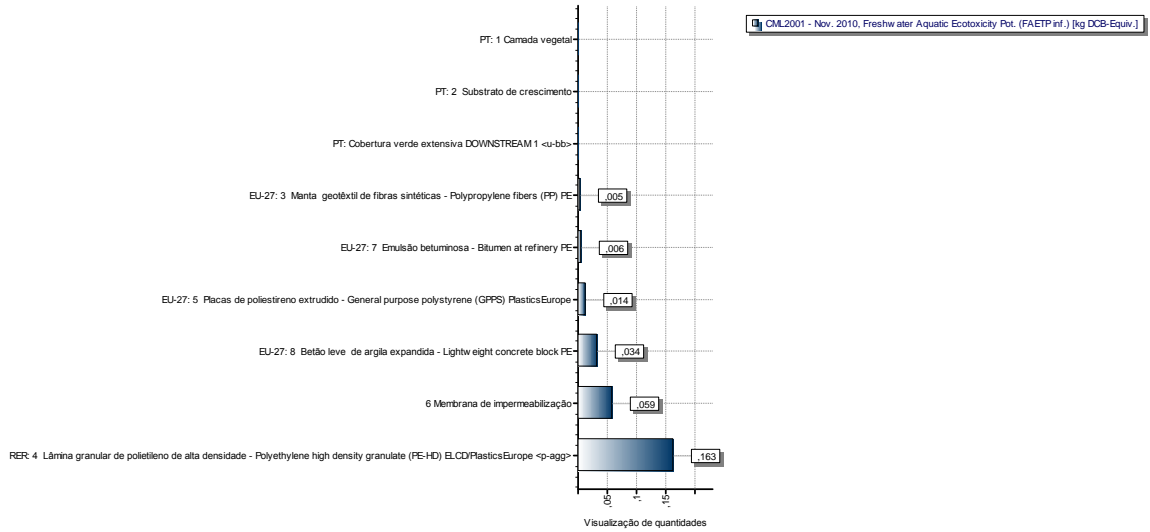


Figura A.8 - CML2001 - Nov. 2010, Freshwater Aquatic Ecotoxicity Pot. (FAETP inf.) [kg DCB-Equiv.], cobertura verde extensiva, (PE Int'l, GaBi. 2014).

Diagrama GaBi: Cobertura verde extensiva 1 - Entradas/Saídas

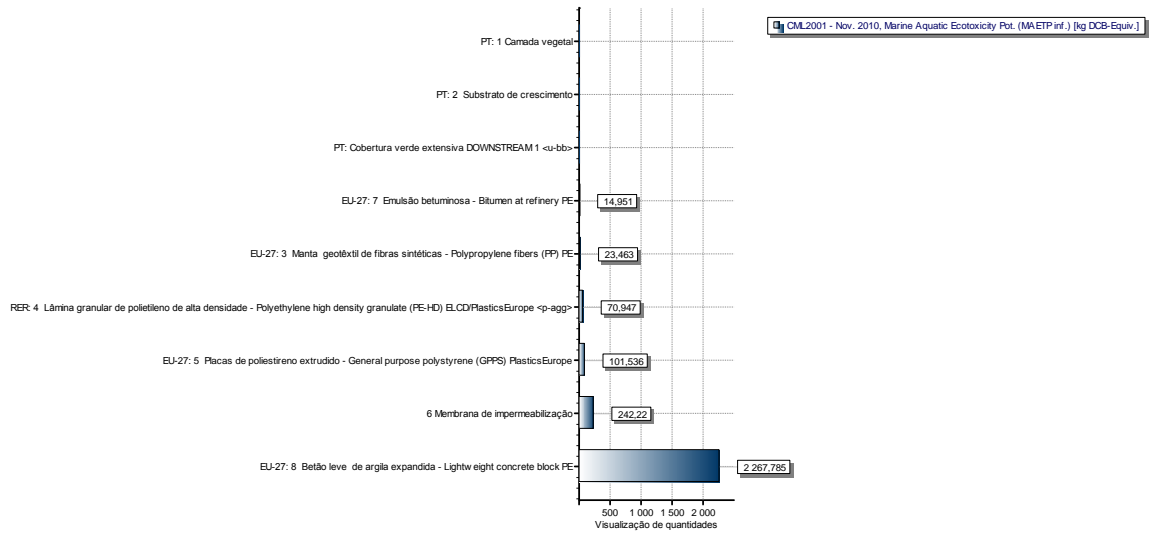


Figura A.9 - CML2001 - Nov. 2010, Marine Aquatic Ecotoxicity Pot. (MAETP inf.) [kg DCB-Equiv.], cobertura verde extensiva, (PE Int'l, GaBi. 2014).