



**João Filipe Matos Coelho**

Licenciado em Ciências de Engenharia Civil

## **Análise do ciclo de vida de argamassas com resíduos de madeira**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em  
Engenharia Civil

Orientador: Doutor Luís Gonçalo Correia Baltazar, Professor Auxiliar da Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade Nova de Lisboa

Júri:

Presidente: Doutor João Carlos Gomes Rocha de Almeida, Professor Associado da Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade Nova de Lisboa

Arguente: Doutora Ana Catarina Pinto de Sousa da Cruz Lopes, Professora Auxiliar da Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade Nova de Lisboa

Vogal: Doutor Luís Gonçalo Correia Baltazar, Professor Auxiliar da Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade Nova de Lisboa



Análise do ciclo de vida de argamassas com resíduos de madeira

“*Copyright*” João Filipe Matos Coelho, FCT/UNL e UNL

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.



## **AGRADECIMENTOS**

Em primeiro lugar, quero agradecer ao orientador da minha dissertação, o professor Luís Baltazar por ter aceitado orientar-me, por todo o conhecimento que me transmitiu e partilhou, pela enorme disponibilidade demonstrada ao longo do tempo.

Gostaria também de agradecer a todos os professores, que pertencem ao Departamento de Civil da Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade Nova de Lisboa, por todo o saber transmitido nas diferentes unidades curriculares que foram imprescindíveis para a realização desta dissertação.

A todos os meus amigos e colegas de curso por todo o apoio, ajuda e amizade que demonstraram ao longo de todo o meu percurso académico,

Por fim, um agradecimento especial à minha família e à minha namorada, que sempre me acompanharam, por todo o apoio incondicional, motivação e sacrifício; por isso tudo e muito mais ficarei eternamente agradecido.



## RESUMO

O sector da Arquitetura, Engenharia, Construção e Operação (AECO) é um dos principais responsáveis pelo crescimento económico e social. Contudo, este sector é também responsável pela extração de uma enorme quantidade de recursos naturais e pela produção de resíduos. Na transformação das matérias-primas extraídas são produzidas elevadas quantidades de emissões gasosas e energia consumida que tem consequências bastante severas para o ambiente. Em Portugal, ainda não está enraizada a prática de reutilização de resíduos na produção de novos materiais, pelo que existe muitos resíduos que são encaminhados para aterro na natureza, o que pode provocar um risco, não só para o ambiente, mas também para a saúde pública.

A areia é um agregado bastante utilizado e muito importante para o fabrico de argamassas e betões. Nas últimas décadas, tem havido uma maior extração desta matéria-prima e muitas fontes foram esgotadas, deixando enorme buracos abertos, e foram construídos edifícios em seu redor, o que pode pôr em risco a vida das pessoas que aí habitam.

Com o objetivo de contribuir para o aumento da sustentabilidade da AECO, têm-se realizado vários estudos para incorporar resíduos em argamassas de revestimento em substituição da areia, que é um recurso não-renovável. Estes estudos têm usado resíduos de madeira, como por exemplo resíduos florestais (biomassa), e obtiveram bons resultados. Apesar da redução da resistência mecânica e da massa volúmica, e o aumento da porosidade aberta, os resultados estão dentro dos limites aceitáveis para uma argamassa de revestimento para edifícios novos ou antigos. O resultado mais benéfico é a diminuição da condutibilidade térmica, sendo que uma argamassa com incorporação de resíduos torna-se mais ecológica, por utilizar resíduos de uma outra indústria.

Para ultrapassar os problemas dos impactes ambientais, devidos à extração dos vários materiais que compõem as argamassas convencionais, procede-se à análise do ciclo de vida de várias argamassas com incorporação de diferentes dosagens de resíduos de madeira em substituição da areia tradicional. Com o intuito de comparar os impactes ambientais provocados por várias argamassas, recorreu-se à ajuda do software OpenLCA que realiza o cálculo global dos impactes ambientais em todas as fases consideradas para cada argamassa, com o auxílio dos dados provenientes de um banco de dados online. Os resultados demonstraram que o cimento é o maior responsável pelos impactes ambientais das argamassas. Numa análise apenas com a areia e os resíduos de madeira, é possível rapidamente concluir que existem efeitos benéficos no impacte ambiental ao substituir até 40% da areia pelos resíduos, obtendo-se ao mesmo tempo uma argamassa bastante competente no desempenho técnico.

Termos Chave: análise do ciclo de vida, resíduos de madeira, argamassa de revestimento, OpenLCA, impactes ambientais





## **ABSTRACT**

The Architecture, Engineering, Construction and Operation (AECO) sector is one of the main responsible for the economic and social growth. However, this sector is also responsible for extracting a large amount of natural resources and producing waste. In the process of extracting raw materials, high quantities of gaseous substances, and energy is consumed, which have very severe consequences for the environment. In Portugal, it is not yet rooted in the practice of waste reuse in the production of new materials, as there is a lot of waste that is sent to the nature, which can cause a risk not only for the environment, but also for public health.

Sand is an aggregate widely used and very important for the manufacture of mortars and concrete. In recent decades, there has been greater extraction of this raw material and many sources have been depleted, leaving huge holes open and buildings were built around them, which can endanger the lives of the people who inhabit it.

Aiming to contribute to the increased sustainability of AECO, they have carried out several studies to incorporate wastes into non-renewable sand replacement mortar. These studies have used wood residues, such as forest residues (biomass), and have obtained good results. Despite reduced mechanical strength and density, and increased open porosity, the results are within acceptable limits for a coating assembly for new or old buildings. The most beneficial result is the reduction of thermal conductivity, and the economy with waste incorporation becomes greener by using waste from another industry.

To overcome the environmental impact problems due to the extraction of various materials that make up the conventional mortars, the life cycle analysis of several rings with incorporation of different dosages of wood waste in substitution of traditional sand were analyzed. In order to compare the environmental impacts caused by various mortars, OpenLCA software was used which performs the global calculation of environmental impacts at all stages considered for each mortar, with the help of online database. The results showed that cement is the major responsible for the environmental impacts of mortars. In a sand and wood waste analysis alone, it can be concluded that there are beneficial effects on the environment impact by replacing up to 40% of sand waste while having a very competent mortar from the technical performance.

Key Terms: life cycle assessment, wood waste, rendering mortar, OpenLCA, environmental Impacts



## ÍNDICE DE MATÉRIAS

RESUMO .....	I
ABSTRACT .....	III
ÍNDICE DE MATÉRIAS .....	V
ÍNDICE DE FIGURAS .....	VII
ÍNDICE DE TABELAS .....	IX
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS .....	XI
<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1. Enquadramento do Tema .....	1
1.2. Objetivos e Metodologia do Trabalho .....	3
1.3. Estrutura do Trabalho .....	4
<b>2. ESTADO DO CONHECIMENTO .....</b>	<b>5</b>
2.1. Avaliação do Ciclo de Vida .....	5
2.1.1. Conceito .....	5
2.1.2. Enquadramento Histórico .....	7
2.1.3. Metodologia .....	8
2.1.4. Softwares de ACV .....	15
2.2. Argamassa de Reboco .....	16
2.2.1. Descrição Geral e Caracterização de Argamassas .....	16
2.2.2. Constituintes das Argamassas e o seu Processo Produtivo .....	18
2.3. Prevenção de Resíduos .....	28
2.3.1. Reciclagem .....	28
2.3.2. Aterro .....	28
<b>3. AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA - OpenLCA .....</b>	<b>29</b>
3.1. Considerações Iniciais .....	29
3.2. Objetivo e Âmbito da Avaliação .....	29
3.2.1. Unidade Funcional .....	30
3.2.2. Fronteira do Sistema .....	30
3.2.3. Descrição dos Dados .....	30

3.2.4.	Pressupostos Assumidos .....	30
3.3.	Análise de Inventário do Ciclo de Vida.....	35
3.4.	Avaliação dos Impactes Ambientais.....	38
4.	<b>APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS</b> .....	41
4.1.	A Produção dos Constituintes das Argamassas .....	42
4.2.	Transporte de Materiais.....	45
4.3.	Categorias de Impacte Seleccionadas.....	46
4.3.1.	Depleção de Recursos Abióticos – Materiais.....	46
4.3.2.	Depleção de Recursos Abióticos - Fósseis.....	47
4.3.3.	Aquecimento Global .....	48
4.3.4.	Depleção do Ozono Estratosférico.....	49
4.3.5.	Formação do Ozono Troposférico.....	50
4.3.6.	Acidificação.....	51
4.3.7.	Eutrofização.....	52
4.3.8.	Uso de Recursos de Energia Primários Não Renovável.....	53
4.3.9.	Uso de Recursos de Energia Primária Renovável.....	54
4.4.	Melhorias .....	55
5.	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS</b> .....	59
5.1.	Conclusões.....	59
5.2.	Desenvolvimentos Futuros .....	60
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	61
	ANEXO I.....	67

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 – Ponte em Entre-os-Rios que colapsou em 2001 .....	1
Figura 1.2 - Colapso de um troço da Estrada Municipal 255 entre Borba e Vila Viçosa em 2018 .....	2
Figura 2.1 - Esquema genérico de um sistema de produto para ACV .....	5
Figura 2.2 - Esquema exemplo de uma série de processos unitários dentro de um sistema de produto .....	7
Figura 2.3 - Esquema das fases de uma AICV .....	8
Figura 2.4 - Fluxograma dos procedimentos para análise de inventário .....	11
Figura 2.5 - Esquema dos elementos numa AICV .....	12
Figura 2.6 - Fluxo entre elementos da fase de interpretação de resultados e as outras fases da AICV .....	14
Figura 2.7 - Classificação das argamassas de reboco segundo a norma NP EN 998-1:2017.....	17
Figura 2.8 - Esquema do processo de produção de cimento .....	18
Figura 2.9 - Método de desmonte: Flanco de encosta,.....	21
Figura 2.10 - Método de desmonte: Corta .....	22
Figura 2.11 - Método de desmonte: Câmara e Pilares .....	22
Figura 2.12 - Processamento dos agregados .....	23
Figura 2.13 - Processo da produção de pellets de madeira .....	25
Figura 2.14 – Moinho de martelos.....	26
Figura 2.15 - Secador de tambor rotativo.....	26
Figura 2.16 - Prensa .....	27
Figura 2.17 - Sistema de arrefecimento .....	27
Figura 3.1 - Esquema do sistema de produto da argamassa utilizada, modelado no software OpenLCA .....	30
Figura 3.2 - Evolução da relação água/ligante em função da percentagem de areia substituída .....	31
Figura 3.3 - Evolução da percentagem de superplastificante em função da relação água/ligante .....	32



## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1 - Softwares de AICV e as bases de dados usadas.....	15
Tabela 3.1 - Relação água/ligante e percentagem de superplastificante .....	31
Tabela 3.2 - Relação água/ligante (função polinomial de 3ºgrau) e percentagem de superplastificante (função polinomial de 2ºgrau) .....	33
Tabela 3.3 - Relação água/ligante (função polinomial de 2ºgrau) e percentagem de superplastificante (função polinomial de 2ºgrau) .....	33
Tabela 3.4 - Relação água/ligante e percentagem de superplastificante assumidos.....	34
Tabela 3.5 - Quantidade de materiais utilizados nas argamassas considerando 1m <sup>3</sup> de agregado....	34
Tabela 3.6 - Quantidade de materiais utilizados para 1 kg argamassa .....	35
Tabela 4.1 - Impacte ambiental das argamassas pelo método CML.....	41
Tabela 4.2 - Impacte ambiental das argamassas pelo método CED.....	42
Tabela 4.3 - Impacte ambiental para 1kg de cada material, pelo método CML .....	42
Tabela 4.4 - Impacte ambiental para 1kg de cada material, pelo método CML .....	43
Tabela 4.5 - Impacte ambiental para 1kg de cada material, pelo método CML .....	43
Tabela 4.6 - Impacte ambiental para 1 kg de material, pelo método CED .....	43
Tabela 4.7 - Impacte ambiental para 1 kg de material, pelo método CED .....	44
Tabela 4.8 - Impacte ambiental para 1kg de cada material, pelo método CED .....	44
Tabela 4.9 - Impacte ambiental de transporte para 1kg·m, pelo método CML.....	45
Tabela 4.10 - Impacte ambiental de transporte para 1kg·m, pelo método CML.....	46
Tabela 4.11 - Impacte ambiental de transporte para 1kg·m, pelo método CED.....	46
Tabela 4.12 - Impacte ambiental de transporte para 1kg·m, pelo método CED.....	46
Tabela 4.13 - Impacte ambiental da componente de materiais da categoria de impacte de depleção de recursos abióticos .....	47
Tabela 4.14 - Impacte ambiental da componente de combustíveis fósseis da categoria de impacte de depleção de recursos abióticos .....	48
Tabela 4.15 - Impacte ambiental da categoria de impacte de aquecimento global.....	49
Tabela 4.16 - Impacte ambiental da categoria de impacte de depleção do ozono estratosférico.....	50
Tabela 4.17 - Impacte ambiental da categoria de impacte de formação de ozono troposférico .....	51
Tabela 4.18 - Impacte ambiental da categoria de impacte de acidificação .....	52
Tabela 4.19 - Impacte ambiental da categoria de impacte de eutrofização .....	53
Tabela 4.20 - Impacte ambiental da categoria de impacte do uso de recursos de energia primários não renováveis.....	54
Tabela 4.21 - Impacte ambiental da categoria de impacte do uso de recursos de energia primários renováveis.....	55
Tabela 4.22 - Melhorias em percentagem das argamassas melhoradas em comparação com a argamassa de referência, pelo método CML.....	56

Tabela 4.23 - Melhorias em percentagem das argamassas melhoradas em comparação com a argamassa de referência, pelo método CED.....	56
Tabela 4.24 - Melhorias em percentagem das argamassas melhoradas em comparação com a argamassa de referência, pelo método CML.....	57
Tabela 4.25 - Melhorias em percentagem das argamassas melhoradas em comparação com a argamassa de referência, pelo método CED.....	57
Tabela 7.1 - Equivalência entre os fluxos de emissões e os fluxos do software OpenLCA, com a respectiva alocação em % .....	67



## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

A	Acidificação
ACV	Análise de ciclo de vida
ACVS	Avaliação do ciclo de vida social
AECO	Arquitetura, Engenharia, Construção e Operação
AG	Aquecimento global
AICV	Análise de impacte do ciclo de vida
a/l	Água/ligante
APA	Agência Portuguesa do Ambiente
APAEUA	Agência de Protecção Ambiental dos Estados Unidos da América
ASTM	American Society for Testing and Materials
CARC	Agregado grosso reciclado proveniente do betão
CCV	Custo do ciclo de vida
CE	Comissão Europeia
CED	Cumulative energy demand
CFCs	Clorofluorcarbonetos
CML	Método do Instituto de Ciências Ambientais da Universidade de Leiden, na Holanda
COVNM	Compostos orgânicos voláteis não metânicos
DA	Declaração ambiental
DAP	Declaração ambiental do produto
DOE	Depleção do ozono estratosférico
DRA	Depleção dos Recursos Abióticos
E	Eutrofização

ELCD	European Life Cycle Database
FOT	Formação do ozono troposférico
GPL	Gás de petróleo liquefeito
ICV	Inventário do ciclo de vida
ITAS	Instituto de Avaliação Tecnológica e Análise de Sistemas, na Alemanha
ISO	International Organization for Standardization
kg CFC-11 eq.	Quilograma de triclorofluorometano equivalente
kg CO <sub>2</sub> eq.	Quilograma de dióxido de carbono equivalente
kg etileno eq.	Quilograma de etileno equivalente
kg PO <sub>4</sub> <sup>-3</sup> eq.	Quilograma de fosfato equivalente
kg Sb eq.	Quilograma de antimónio equivalente
kg SO <sub>2</sub> eq.	Quilograma de dióxido de enxofre equivalente
MJ	Mega Joule
NO <sub>x</sub>	Óxidos de Azoto
PA	Potencial de acidificação
PAG	Potencial de aquecimento global
PDOE	Potencial de depleção do ozono estratosférico
PDRA	Potencial de depleção dos recursos abióticos
PE	Potencial de eutrofização
PIP	Política integrada de produtos
POF	Potencial de oxidação fotoquímica
PUREP–NR	Potencial do uso de recursos de energia primária não renovável
PUREP–R	Potencial do uso de recursos de energia primária renovável

RCD Resíduos de Construção e Demolição

SP Superplastificante

UREP–NR Uso de recursos de energia primária não renovável

UREP–R Uso de recursos de energia primária renovável



## 1. INTRODUÇÃO

### 1.1. Enquadramento do Tema

O sector da Arquitetura, Engenharia, Construção e Operação (AECO) é responsável por 7,5% da economia, 25% da produção industrial e dá emprego a 28,1% de trabalhadores em toda a Europa, sendo um dos maiores exportadores a nível mundial (Torgal & Jalali, 2010). No que diz respeito ao ambiente o cenário inverte-se completamente, pois este sector é responsável por 30% das emissões de carbono, bem como do consumo de 42% da energia, sendo que consome cerca de 50% das matérias-primas a nível mundial (Torgal & Jalali, 2010).

Os agregados de origem petrográfica constituem uma grande parte das argamassas e betões usados para realizar vários tipos de construções. As areias, as britas e os gados são agregados que têm sido extraídos e utilizados a um ritmo muito elevado nas últimas décadas, devido ao aumento de população que consequentemente levou ao aumento da urbanização (Padmalal & Maya, 2014). Estas matérias-primas são extraídas de pedreiras, rios e lagos, sendo também extraídas de zonas costeiras, mas em muito menor quantidade, atendendo à elevada concentração de sais. A extração da matéria-prima devia ser sempre realizada por empresas qualificadas para tal efeito, pois por vezes não é o que acontece. Contudo, a exploração de agregados provenientes das fontes atrás referidas, leva a muitos problemas ambientais, tais como, a poluição devido às emissões produzidas, a alteração dos leitos dos rios e a alteração da paisagem ambiental (Ahmed & Sturges, 2015).

É bom lembrar um exemplo de um acidente causado por estes problemas ambientais que aconteceu em 2001, quando uma ponte em Entre-os-Rios colapsou e provocou a morte a 59 pessoas, como se ilustra na Figura 1.1 (Renascença, 2016). Uma das hipóteses admitidas para as causas deste acidente foi a extração em excesso das areias no leito do rio Douro, onde a gestão e o controlo desta atividade falha redondamente e põe em risco vidas humanas e os ecossistemas (Público, 2004).

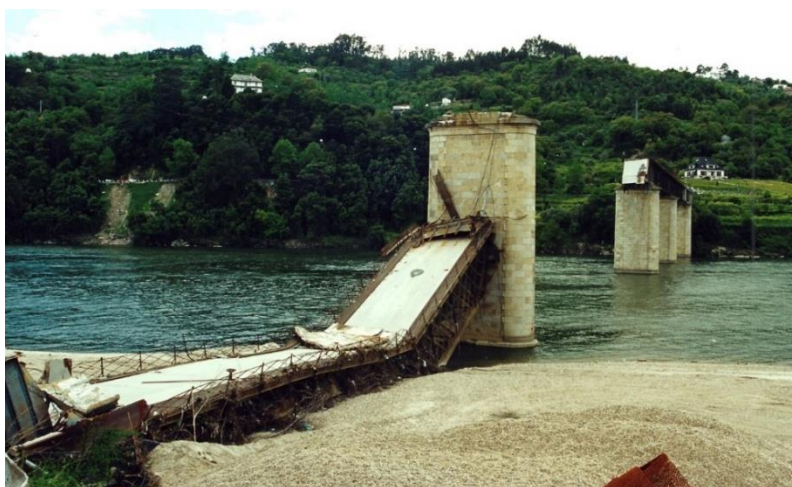


Figura 1.1 – Ponte em Entre-os-Rios que colapsou em 2001 (Renascença, 2016)

Outro exemplo de um acidente registado em Portugal, ilustrado na Figura 1.2, ocorreu no dia 19 de novembro de 2018, quando um deslizamento de terras e o colapso de um troço da Estrada Municipal 255, que faz a ligação entre Borba e Vila Viçosa, provocou a morte a 5 pessoas (JN, 2018). O acidente deveu-se à extração excessiva de matéria-prima numa pedreira, sem o devido planeamento, gestão e controlo, e onde consequentemente deixando a céu aberto enormes buracos com dezenas de metros de diâmetro e profundidade, provocando um impacte ambiental enorme e pondo também em risco vidas humanas.



Figura 1.2 - Colapso de um troço da Estrada Municipal 255 entre Borba e Vila Viçosa em 2018 (Fonte: LUSA)

A velocidade da exploração de agregados é alarmante pois envolve um grande volume de material, sendo que essa velocidade excede a taxa de renovação natural do agregado e pode pôr em causa a sua sustentabilidade (UNEP, 2014). A consciencialização desta problemática leva à procura de resíduos ou subprodutos de outras indústrias que possam ser aproveitados, para reduzir o consumo de areia e cascalho.

Em 2015, a Comissão Europeia (CE) adotou o Plano de Ação de Economia Circular que promove o crescimento económico sustentável. Este plano de ação tem medidas e estratégias de valorização de resíduos, para minimizar a quantidade de resíduos em aterro. Estas medidas podem passar pela reutilização, recuperação e reciclagem de produtos (CE, 2015, 2018).

Com o objetivo de promover a sustentabilidade no sector da AECO têm sido realizados vários estudos (Farinha, Silvestre, & Brito, 2019; Martinho, 2017; Monteiro, 2017; Pinho, 2016; Silva, 2017) com o intuito de substituir em parte os agregados naturais por outros materiais, nomeadamente por resíduos de madeira (provenientes de pellets de madeira) na formulação de argamassas para revestimento. Os pellets de madeira são compostos por resíduos de madeira prensados provenientes das indústrias de transformação da madeira (CEN, 2014). Como seria de esperar a introdução destes resíduos de madeira na composição da argamassa para a diminuição da quantidade de areia, produziu resultados inferiores em comparação com uma argamassa corrente, como por exemplo a diminuição da resistência

mecânica e da massa volúmica, e o aumento da porosidade aberta. Ainda assim, os valores obtidos cumprem os requisitos mínimos exigidos na norma portuguesa NP EN 998:2017 (IPQ, 2017) para argamassas de reboco.

O presente trabalho pretende analisar os impactes ambientais causados pela produção de argamassas com resíduos de madeira, recorrendo a um programa usado para avaliação do ciclo de vida (ACV) de produtos.

## **1.2. Objetivos e Metodologia do Trabalho**

No seguimento dos estudos já referidos anteriormente, em que foi feita uma caracterização física e mecânica de argamassas de reboco com incorporação de resíduos de madeira, surge a presente dissertação com a finalidade de efetuar uma análise do ciclo de vida dessas argamassas com resíduos de madeira.

Esta dissertação tem como principal objetivo a realização da avaliação do ciclo de vida (ACV), de forma a avaliar os impactes ambientais provenientes da produção de argamassas de reboco com substituição do agregado natural (areia) por resíduos de madeira. Para a realização desta dissertação é necessário identificar e quantificar de modo sistemático e científico todos os materiais, a energia, os resíduos e emissões produzidas desde o processo de extração dos recursos até à aplicação da argamassa de reboco em obra.

A ACV possibilita a avaliação dos impactes ambientais associados a um determinado produto, processo ou serviço. Para a realização da presente dissertação recorreu-se ao software OpenLCA para a avaliação do ciclo de vida. O OpenLCA é um software que permite analisar o desempenho ambiental de produtos ou serviços. Com o auxílio deste software é possível facilmente modelar e analisar ciclos de vida complexos de modo claro e sistemático (GmbH, 2017).

Esta ACV é realizada de acordo com a norma ISO 14040:2006 que propõe quatro etapas para a realização da mesma, sendo essas etapas o objetivo e o âmbito da análise, a análise do inventário do ciclo de vida, a avaliação dos impactes ambientais e a interpretação dos resultados.

### **1.3. Estrutura do Trabalho**

Esta dissertação divide-se em 6 capítulos, apresentados de seguida com uma breve descrição.

No capítulo 1, Introdução, é feito o enquadramento do tema, os objetivos que levaram à realização desta dissertação e é apresentada a estrutura do trabalho.

No capítulo 2, Estado do conhecimento – é abordado o tema da avaliação do ciclo de vida, de uma argamassa de reboco com resíduos de madeira. Faz-se um enquadramento histórico da ACV e da sua metodologia. No tema das argamassas de reboco descrevem-se em que consiste uma argamassa, os seus vários tipos, as exigências funcionais que devem ser cumpridas por uma argamassa de reboco, e é feita uma descrição do processo produtivo do cimento, da areia e dos resíduos de madeira (provenientes de pellets). Ainda neste capítulo, é abordado o tema da prevenção de resíduos e são apresentadas duas medidas que se podem adotar quando uma argamassa chega ao fim de vida.

No capítulo 3, Avaliação do ciclo de vida – OpenLCA, é descrito de uma maneira geral o software usado na presente dissertação, assim como todos os passos que foram dados para a realização da ACV.

No capítulo 4, Apresentação e discussão dos resultados, são apresentados os resultados obtidos com o software OpenLCA, descrito no capítulo anterior. São ainda feitas uma interpretação e uma análise crítica dos resultados.

No capítulo 5, Considerações finais, são apresentadas as conclusões alcançadas e algumas propostas de desenvolvimento futuras.



## 2. ESTADO DO CONHECIMENTO

### 2.1. Avaliação do Ciclo de Vida

#### 2.1.1. Conceito

A Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), do inglês *Lyfe Cycle Assessment* (LCA), é uma ferramenta que pode ser usada para avaliar os efeitos ambientais de um produto, processo ou atividade, (Curran, 1996). A definição de ACV, segundo a norma ISO 14040:2006, é a compilação e avaliação das entradas, saídas e dos possíveis impactes ambientais relacionados com um sistema, produto ou serviço ao longo do seu ciclo de vida.

A ACV tem como suporte o reconhecimento e a quantificação de todos os fluxos de entrada e de saída associados a todos os processos envolvidos no ciclo de vida de um sistema produto ou serviço, para que se possa identificar, quantificar e avaliar os impactes ambientais, e assim, caracterizar o seu desempenho ambiental. A estrutura completa de um sistema de produto, assim como todos os seus elementos, é apresentada na Figura 2.1.

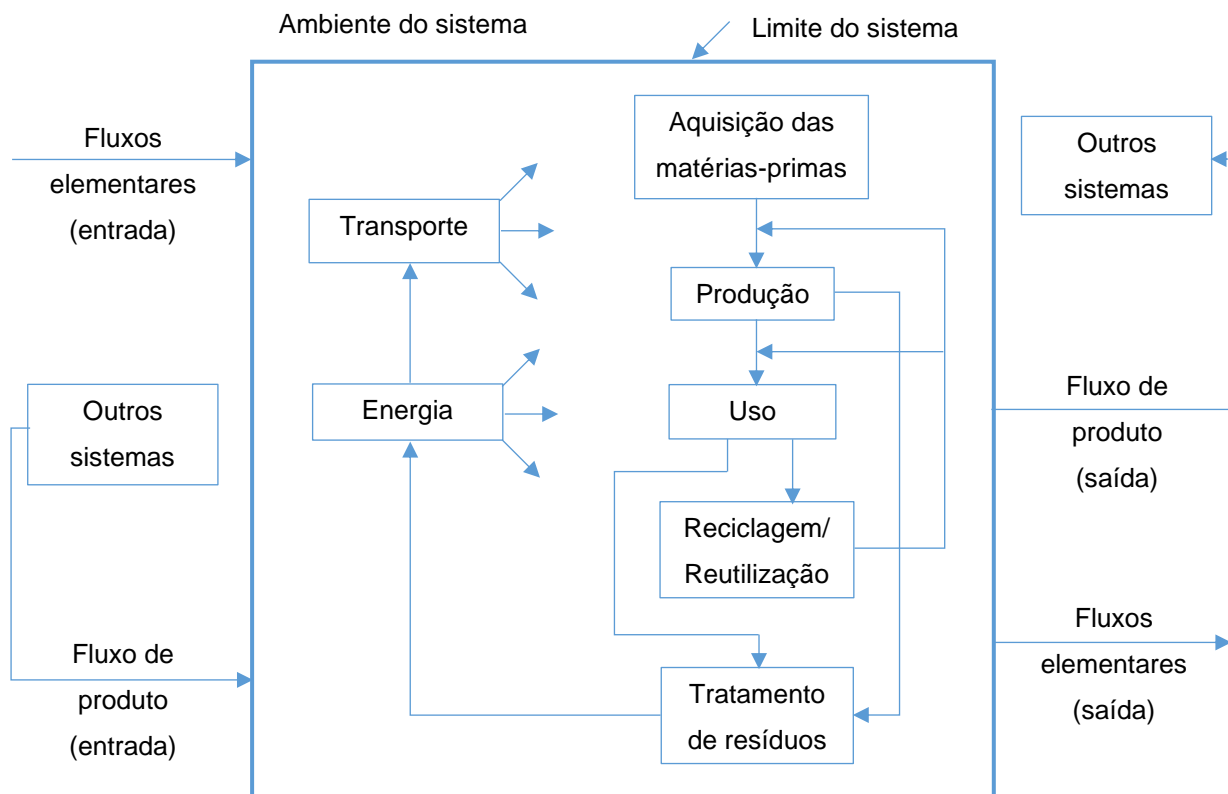


Figura 2.1 - Esquema genérico de um sistema de produto para ACV (Adaptado de ISO 14040 - 2006)

O limite do sistema em que a ACV é realizada é o conjunto de critérios que distingue quais os processos que o sistema engloba (Klöpffer, 2014). Uma ACV pode ser desenvolvida através de uma análise *cradle to grave* (do berço ao túmulo), sendo a extração e obtenção das matérias-primas considerada como

berço e o destino final do resíduo como sendo o túmulo. A ACV inclui ainda outros processos como a produção e fabrico e a utilização real do produto ou serviço, e ainda outros processos secundários como o transporte de recursos e o fornecimento energia. Todos os fluxos que estão fora do limite do sistema não são contabilizados para a ACV (Hauschild & Huijbregts, 2015).

A aquisição das matérias-primas engloba todos os procedimentos relacionados com a extração da matéria-prima diretamente da natureza, assim como os recursos consumidos e as emissões produzidas. A produção inclui vários processos desde o processamento e aplicação da matéria-prima passando pela criação do produto final, até ao armazenamento e expedição do produto. O uso compreende a utilização real do produto final, para cumprimento de uma das funcionalidades para o qual foi concebido, incluindo também os processos de manutenção. A reciclagem/reutilização e tratamento de resíduos é a última fase do ciclo de vida de qualquer sistema de produto. Os dois primeiros processos correspondem à recuperação do resíduo, voltando a inseri-lo no processo de produção como matéria-prima. Por outro lado, o tratamento de resíduos refere-se à sua deposição em aterro ou à valorização energética (Curran, 1996).

Todos os elementos usados na realização de um sistema de produto podem ser classificados em três grupos (Oliveira, 2005):

1. Fluxos de entrada, que englobam o fornecimento de energia, as matérias-primas, os produtos auxiliares e outros materiais utilizados;
2. Produtos finais;
3. Emissões libertadas para a atmosfera, efluentes líquidos, materiais descarregados no solo e outros impactes ambientais.

O fluxo elementar é um recurso que entra no sistema a partir da sua extração da natureza sem qualquer interferência do Homem, ou que sai do sistema e é libertado no ambiente sem qualquer tipo de tratamento. O fluxo de produto é um produto que entra no sistema a partir de outro sistema ou sai para outro sistema.

Todas as fases que constituem um sistema de produto são compostas por processos unitários. O processo unitário é o elemento mais simples na ACV, para o qual são associados fluxos de entrada, de saída e intermédios e estes são quantificados, como mostra a Figura 2.2. Os processos unitários estão ligados entre si por fluxos intermédios. Os fluxos intermédios consistem nos produtos intermédios que ocorrem durante a fase de produção.

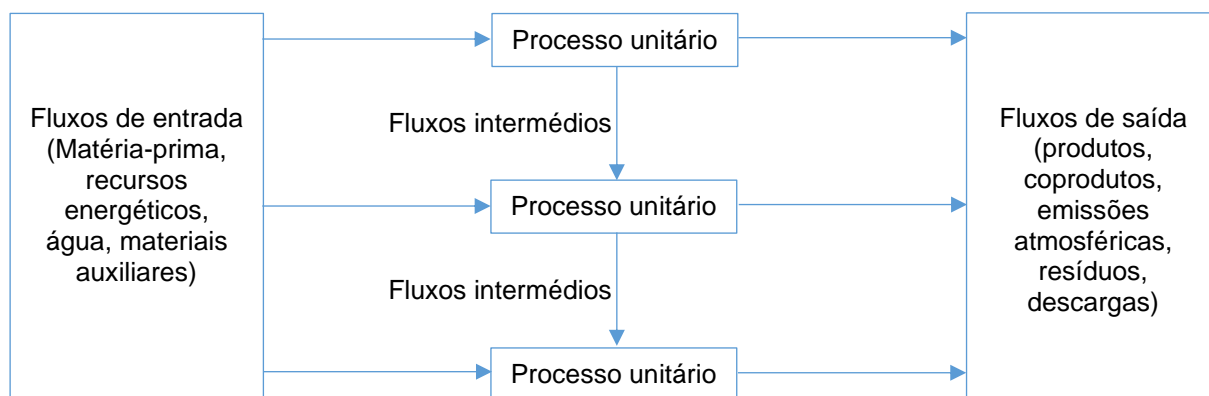


Figura 2.2 - Esquema exemplo de uma série de processos unitários dentro de um sistema de produto (Adaptado de ISO 14040 - 2006)

### 2.1.2. Enquadramento Histórico

Os primeiros estudos sobre o tópico deste capítulo aconteceram na década de 70, devido à crise petrolífera então ocorrida, embora estes trabalhos fossem basicamente estudos energéticos, como por exemplo os trabalhos realizados nos E.U.A. relacionados com as avaliações dos ciclos de diversos combustíveis. A noção de ACV surgiu mais tarde, na década de 80, quando os estudos energéticos passaram a incluir os efeitos ambientais relacionados com o ciclo de vida de produtos, enquanto na Europa o movimento ecologista lançou o tema da reciclagem, essencialmente aplicado às embalagens. Desde 1990 tem recebido muita atenção e importância, depois de ter sido publicado uma série de referências normativas e estudos de mercado para comparar produtos concorrentes que cumprem a mesma função (Ferrão, 1998). A metodologia da ACV foi desenvolvida pela organização “*Society of Environment Toxicology and Chemistry*”, devido ao aumento do interesse por esta ferramenta e o alargamento do objetivo da sua utilização para além do consumo energético (Klöpffer, 2014). Foram criadas várias normas ISO relativamente a esta matéria, nomeadamente as seguintes:

- ISO 14020:2000 Rótulos e declarações ambientais – Princípios gerais;
- ISO 14040:1997 Gestão ambiental – Avaliação do ciclo de vida: princípios e estrutura básica;
- ISO 14041:1998 Gestão ambiental – Avaliação do ciclo de vida: objetivos, âmbito e inventário do ciclo de vida;
- ISO 14042:2000 Gestão ambiental – Avaliação do ciclo de vida: análise dos impactes associados ao ciclo de vida;
- ISO 14043:2000 Gestão ambiental – Avaliação do ciclo de vida: interpretação;
- ISO 14044:2006 – Gestão ambiental – Avaliação do ciclo de vida: requisitos e diretrizes.

Em 2006, as normas ISO 14040:1997, ISO 14041:1998, ISO, 14042:2000 e ISO 14043:2000 sofreram uma revisão, tendo sido substituídas pelas normas ISO 14040:2006 e ISO 14044:2006. Esta revisão veio a uniformizar os estudos de ACV e a facilitar a sua aplicação, assim como a comparação e relação entre resultados. As normas que se encontram em vigor atualmente são as seguintes:

- ISO 14020:2000 Rótulos e declarações ambientais – Princípios gerais;
- ISO 14040:2006 Gestão ambiental – Avaliação do ciclo de vida – Princípios e estrutura da ACV;
- ISO 14044:2006 Gestão ambiental – Avaliação do ciclo de vida – Requisitos e diretrizes.

### 2.1.3. Metodologia

De acordo com a norma ISO 14040:2006, para uma completa avaliação do ciclo de vida, é indispensável a análise conter quatro componentes: o objetivo e o âmbito da análise (i), a análise do inventário do ciclo de vida (ii), a avaliação dos impactes ambientais (iii) e a interpretação dos resultados (iv). Esta estrutura encontra-se representada na Figura 2.3.



Figura 2.3 - Esquema das fases de uma AICV

#### i. Objetivo e âmbito da análise

A primeira fase essencial de uma ACV consiste na definição do objetivo e do âmbito da análise. É importante que estas duas definições sejam bem detalhadas e clarificadas, para que a ACV possa ser o mais eficiente possível. O primeiro passo desta fase é a definição do objetivo, o qual deve considerar os seguintes pontos:

1. A finalidade a que se destina o objeto a estudar;
2. As razões para a realização do estudo;
3. O público alvo, ou seja, para quem os resultados do estudo são destinados a ser comunicados.

Para a definição de âmbito de uma ACV devem ser considerados os seguintes pontos (Oliveira, 2005):

1. O objeto a ser estudado;
2. As funções do sistema de produto ou serviço, ou, no caso de estudos comparativos, dos sistemas;
3. A unidade funcional;
4. Os limites do sistema de produto;
5. As regras de alocação;
6. As categorias e os métodos de avaliação de impacto ambiental, e posterior interpretação dos resultados;
7. Os dados necessários para caracterização do sistema;
8. Os pressupostos considerados;
9. As limitações do estudo a desenvolver;
10. Os requisitos iniciais quanto à qualidade dos dados selecionados;
11. O tipo da revisão crítica, se existir;
12. O tipo e estrutura obrigatória do relatório final a elaborar no estudo em causa.

### *1. Objeto a ser estudado*

Para definir claramente o produto ou serviço, é necessário fazer uma descrição do objeto em estudo incluindo as especificações técnicas do produto ou serviço.

### *2. Funções do sistema(s) de produto ou serviço*

Um sistema pode ter várias funções possíveis e as selecionadas para o estudo dependem da definição e do âmbito da ACV. Num estudo comparativo, caso um dos sistemas tenha uma ou mais funções que não considera na definição da unidade funcional, é necessário que as desigualdades verificadas sejam explicadas pormenorizadamente (ISO, 2006b).

### *3. Unidade funcional*

O conceito de unidade funcional quantifica as características de desempenho das funções identificadas do produto ou serviço. O propósito fundamental da unidade funcional é constituir uma referência, em relação à qual se determina os dados de entrada e de saída (Ferrão, 1998). Deve ainda ser considerada a eficácia e a vida útil do produto na definição de unidade funcional. No caso dos estudos comparativos, só é lógico fazê-los quando os produtos ou serviços comparados têm funções equivalentes. Os sistemas devem ser comparados segundo a mesma unidade funcional para que os resultados da ACV sejam credíveis.

#### *4. Limites do sistema de produto*

Os limites do sistema do produto ou serviço definem os processos envolvidos no sistema e representam a separação entre o sistema e o ambiente em que está incluído (Ferrão, 1998). É necessário que o sistema de produto ou serviço seja modelado de tal modo que no seu limite as entradas e saídas sejam fluxos elementares. Estas entradas são contabilizadas desde o momento da extração das matérias primas, enquanto as saídas são seguidas até à deposição final do resíduo no meio ambiente. Para determinar o limite do sistema devem ser considerados processos unitários e fluxos, tais como (ISO, 2006a):

- A aquisição de matérias-primas;
- As entradas e saídas (fluxos de matéria e energia) na sequência de produção;
- A distribuição e o transporte;
- A produção e a utilização de combustíveis, de eletricidade e calor;
- O uso e a manutenção de produtos;
- A eliminação dos resíduos do processo e dos produtos;
- A recuperação de produtos utilizados (incluindo a reutilização, a reciclagem e a recuperação de energia);
- O fabrico de materiais auxiliares ao processo principal;
- O fabrico, a manutenção e a desativação dos equipamentos;
- As operações de manutenção, tais como iluminação e aquecimento.

#### *5. Regras de alocação*

Existem processos industriais que produzem uma única saída (produto ou serviço) ou baseiam-se numa série de entradas de matéria-prima e de saídas. Na generalidade dos casos, os processos industriais produzem mais do que um só produto e reciclam os produtos intermédios ou descartados como matéria-prima. Portanto, os fluxos de matéria e de energia gerados, assim como os diferentes resíduos e emissões libertadas para o ambiente, devem ser distribuídos pelos diferentes produtos segundo procedimentos bem definidos e justificados. Deve-se considerar a necessidade de procedimentos de alocação quando se trabalha com sistemas em que estão envolvidos múltiplos produtos e sistemas de reciclagem.

De acordo com a norma ISO 14044:2006, deve ser aplicado o procedimento de alocação dividido nas seguintes três etapas:

- Etapa 1 – É recomendável, sempre que possível, evitar a alocação através da:
  - divisão do processo unitário em dois ou mais subprocessos;
  - ampliação do sistema de produto ou serviço para evitar a alocação;

- Etapa 2 – Nos casos em que a alocação não pode ser evitada, deve-se aplicar uma relação física (por exemplo, massa, energia, volume) entre os produtos envolvidos no processo;
- Etapa 3 – Quando não é possível estabelecer uma relação física, deve-se aplicar uma relação de acordo com o valor económico dos produtos.

## ii. Análise do inventário do ciclo de vida

A análise do inventário do ciclo de vida (ICV) destina-se à compilação e tratamento de dados e aos processos de cálculo para quantificar os fluxos de matéria e de energia que entram e saem de um sistema de produto (Oliveira, 2005). Estes fluxos podem incluir a utilização de recursos, tanto de materiais como de energia, e emissões libertadas para o solo, ar e água. A estrutura da análise do ICV é representada pelo fluxograma da Figura 2.4.

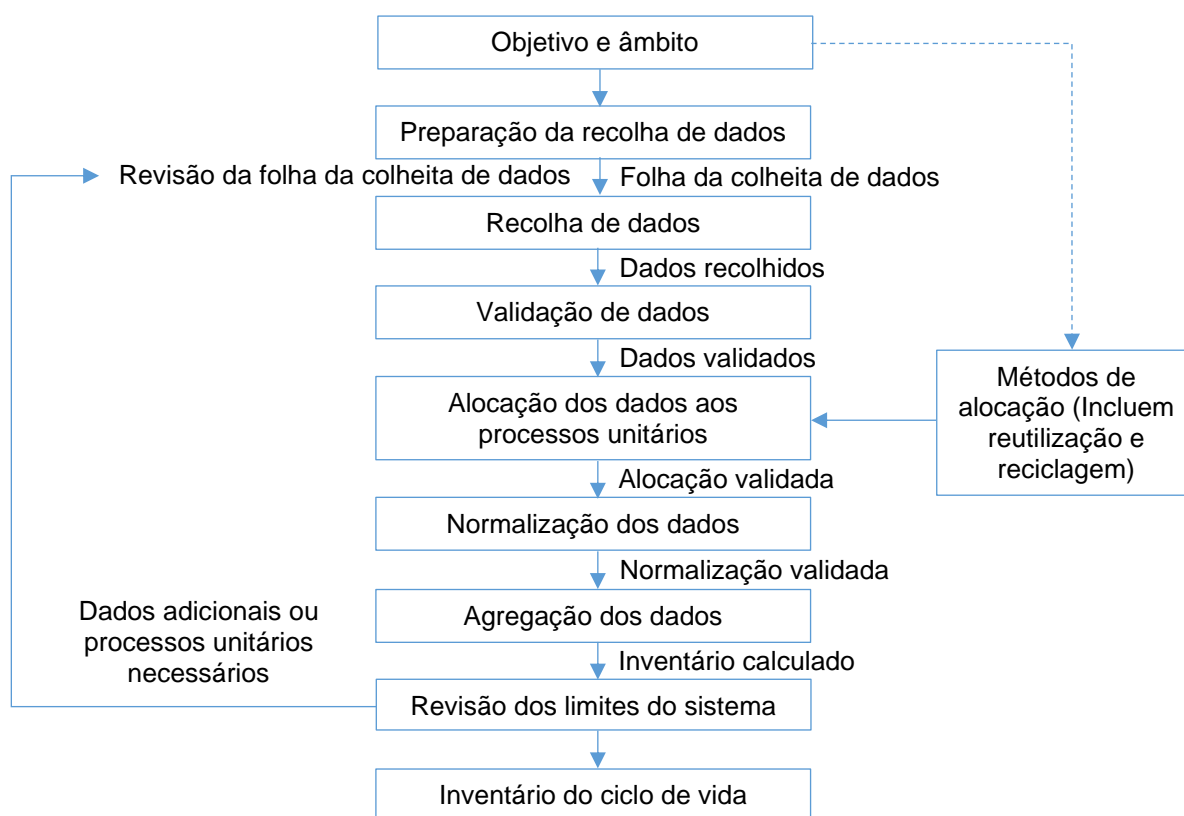


Figura 2.4 - Fluxograma dos procedimentos para análise de inventário (ISO 14044 - 2006)

Esta análise do inventário é um processo iterativo, pois à medida que os dados são recolhidos o sistema é melhor conhecido e vão aparecendo novas exigências e limitações em relação aos dados recolhidos e aos cuidados a ter na sua recolha. Em Portugal, quando as empresas industriais são consideradas consumidoras intensivas pela Direção Geral de Energia e Geologia, são obrigadas a realizar auditorias energéticas, sendo que esses dados recolhidos podem ser usados numa ACV (DGEG, 2019). Após a quantificação de todos os dados recolhidos de todos os processos considerados, resulta uma tabela

de inventário agrupada pelas categorias de impacto consideradas, tais como o aquecimento global ou a diminuição da camada de ozono.

### iii. Avaliação dos impactos ambientais

A avaliação de impacto do ciclo de vida (AICV) tem como objetivo avaliar os potenciais impactos prejudiciais para o ambiente, de acordo com os dados obtidos na análise de inventário. Esta avaliação é composta por cinco componentes, sendo que existem três obrigatórios e dois opcionais. A estrutura da AICV está representada na Figura 2.5.

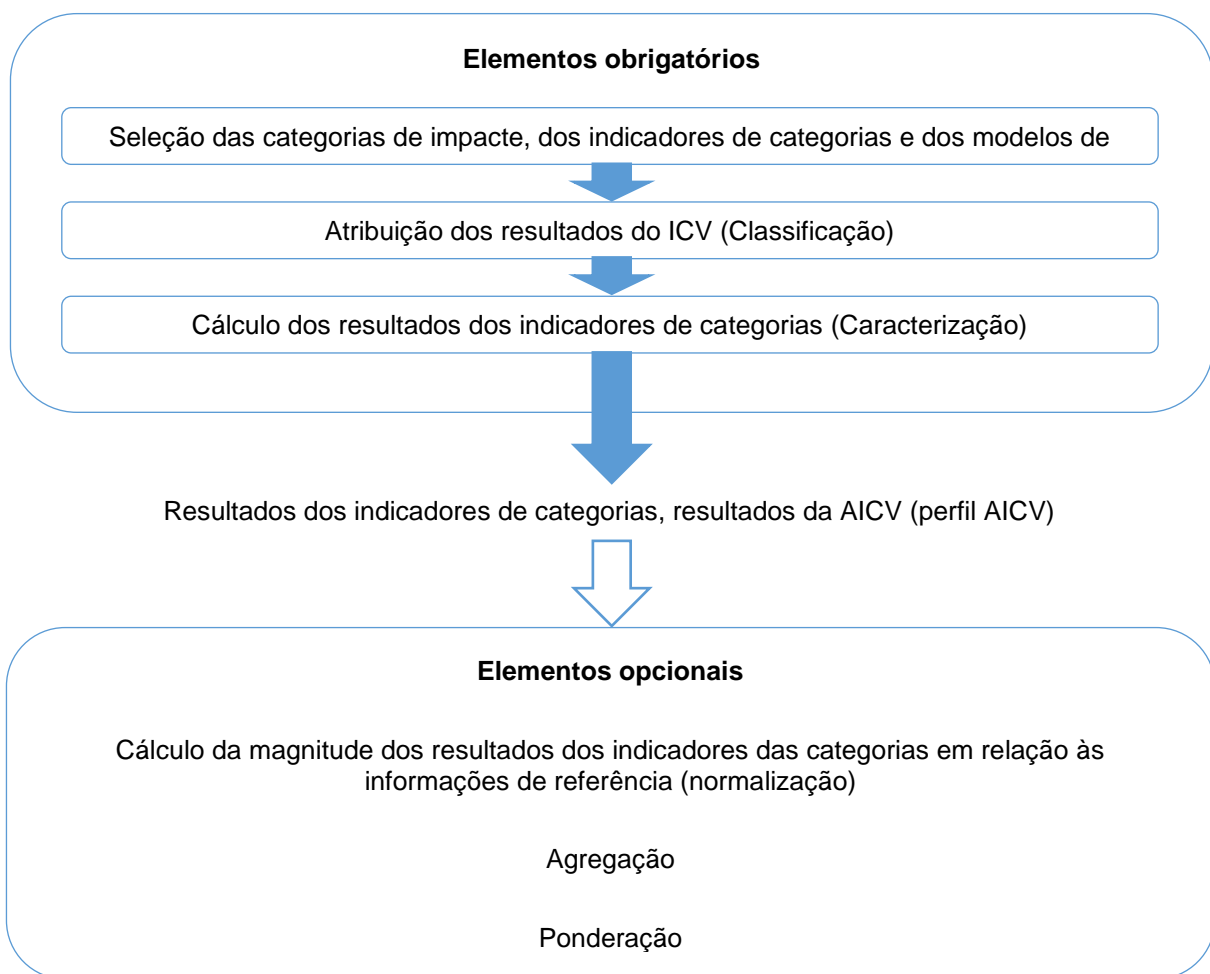


Figura 2.5 - Esquema dos elementos numa AICV (ISO 14040 - 2006)

De acordo com a norma ISO 14044:2006, a avaliação dos impactos ambientais é composta pelos seguintes componentes:

1. Classificação;
2. Caracterização;
3. Normalização;
4. Agregação;
5. Ponderação.



### *1. Classificação*

A componente da classificação estabelece a correspondência entre os dados da tabela de inventário e as categorias ambientais, que é realizada através da atribuição de ponderações onde cada entrada da tabela de inventário contribui nas categorias de impactes ambientais, sendo que não se estabelece qualquer relação entre os dois. As normas ISO não indicam que categoria de impacte deve ser utilizada. Com efeito, cada categoria de impacte tem uma importância de acordo com a realidade ambiental do país em que o estudo é feito.

### *2. Caracterização*

A componente da caracterização corresponde ao cálculo, por meio de fatores de caracterização, para converter as substâncias listadas na tabela de inventário numa substância padrão para cada categoria de impacte para a qual essa substância contribua. Por exemplo, as substâncias de NO<sub>x</sub> contribuem tanto para fenómenos de acidificação como de eutrofização, apesar de contribuírem com pesos diferentes para cada uma dessas categorias. No final desta componente é possível obter o perfil ambiental da unidade funcional do produto ou serviço em estudo.

### *3. Normalização*

A componente da normalização tem como objetivo compreender, com clareza e rigor, o significado da magnitude relativamente aos valores obtidos tendo em consideração cada um dos indicadores de categorias de impacte selecionadas. O cálculo dessa magnitude, relativamente a um dado referencial, é designado de normalização. Este cálculo é efetuado dividindo o valor do indicador ambiental em causa por um valor de referência específico, que neste caso é dividido pelo número de cidadãos.

### *4. Agregação*

A componente da agregação, como o próprio nome indica, serve para agregar as diversas categorias de impacte em uma ou várias categorias, sendo que este caso deverá ser previamente definido tendo em conta os objetivos dos estudos da ACV. Esta agregação pode ser realizada de uma das seguintes formas:

- a) Tipificação das categorias de impacte, ou seja, caracterizar as emissões e recursos numa visão espacial, como por exemplo, global, regional ou local;
- b) Hierarquização das categorias de impacte, ou seja, definir uma classificação tendo em conta a prioridade concedida ao respetivo controlo ou combate, por exemplo, prioridade alta, média ou baixa.

## 5. Ponderação

Na componente da ponderação, tal como na agregação, utilizam-se fatores numéricos que são aplicados aos resultados das categorias de impacto selecionadas. Esta ponderação pode resultar num só valor, designado como valor ambiental único. Este valor exprime o efeito total que o produto ou sistema produz em toda a sua vida para o meio ambiente, pois engloba muita informação num único valor. Este valor facilita a comparação de vários produtos, pois só existe um valor para comparar.

### iv. Interpretação dos resultados

A última fase de uma ACV é a interpretação dos resultados, onde são avaliados em conjunto os resultados da análise do inventário e da avaliação dos impactos. Esta fase tem como objetivo selecionar o produto ou serviço mais correto ambientalmente, tendo em conta também as incertezas e pressupostos assumidos na realização do estudo. A estrutura da fase de interpretação dos resultados da AICV está representada na Figura 2.6.

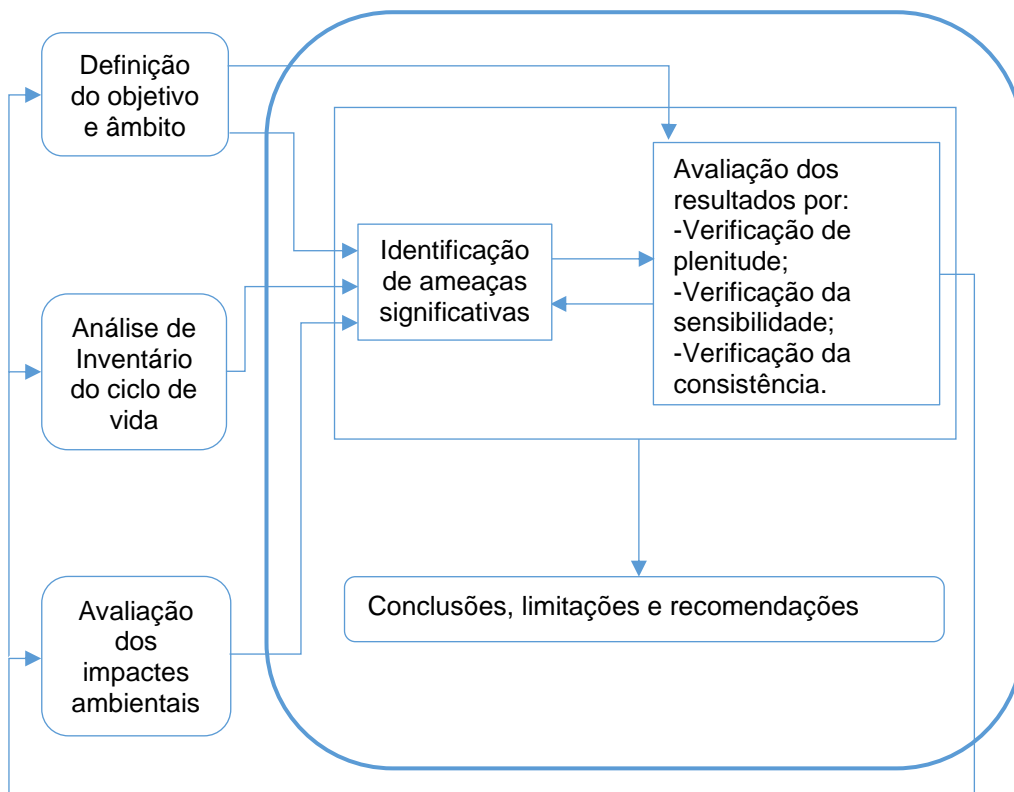


Figura 2.6 - Fluxo entre elementos da fase de interpretação de resultados e as outras fases da AICV (ISO 14044 - 2006)

#### 2.1.4. Softwares de ACV

De modo a dar uma resposta à necessidade de uma ACV, têm sido desenvolvidas ferramentas informáticas que servem de apoio às avaliações realizadas. Estes programas desenvolvidos centram-se principalmente na realização do ICV e da AICV. Existem ainda base de dados atualizadas e métodos de cálculo de indicadores que são disponibilizados por várias empresas de diferentes países. O software OpenLCA é o único programa de ACV que não necessita de licença de utilização. Na Tabela 2.1 encontram-se todos os programas consultados, uma breve descrição dos mesmos e as bases de dados aceites em cada um dos programas.

Tabela 2.1 - Softwares de AICV e as bases de dados usadas

Programa	Descrição	Base de dados
BEES (EUA)	BEES é um software que fornece ao utilizador uma poderosa técnica para a seleção de produtos económicos e ambientalmente mais favoráveis. Foi desenvolvido pelo Laboratório de Engenharia do NIST (National Institute of Standards and Technology), a sendo baseado em padrões de consenso e projetado para ser prático, flexível e transparente (NIST, 2019).	
GaBi (Alemanha)	GaBi é um programa desenvolvido pela Thinkstep e serve para modelar todos os elementos do produto ou do sistema do ponto de vista da ACV. Este programa facilita as empresas na realização da ACV e permite ainda tornar o produto mais sustentável e mais económico, indo de encontro às expectativas do consumidor (Thinkstep, 2019).	Ecoivent GaBi Database U.S. Lifecycle Inventory Database (USLCI)
One Click LCA (Finlândia)	One Click LCA é a ferramenta LCA de classificação mais alta para BREEAM, um método de avaliação ambiental criado pelo BRE (Building Research Establishment). Esta ferramenta foi desenvolvida pela empresa de consultoria Bionova e é um software para suportar projetos de construção (Bionova, 2019).	Ecoivent GaBi Database Ökobaudat
OpenLCA (Alemanha)	OpenLCA é um programa profissional opensource para ACV, desenvolvido pela GreenDelta. O programa tem diversas aplicações como por exemplo, AICV, Custo do Ciclo de Vida (CCV), Avaliação do Ciclo de Vida Social (ACVS), pegadas de carbono e da água, Declaração Ambiental do Produto (DAP). Para além das bases de dados e métodos de avaliação de impacte disponíveis, o programa permite ainda ao utilizador criar as suas próprias bases de dados e que estas sejam compartilhadas (GmbH, 2017).	Agribalyse Bioenergiedat Ecoivent European Lifecycle Database (ELCD) GaBi Database LC-Inventories.ch NEEDS Ökobaudat ProBras Social Hotspots USDA

Tabela 2.1 - Softwares de AICV e as bases de dados usadas (Continuação)

Programa	Descrição	Base de dados
SimaPRO (Holanda)	SimaPro é um programa profissional desenvolvido pela Pré-Consultants. Este software pode ser usado para uma variedade de aplicações, como relatórios de sustentabilidade, geração de DAP e determinação dos principais indicadores de desempenho. Inclui uma quantidade de base de dados sempre atualizada e possível de editar (Pré-Consultants, 2019).	Agri-Footprint Inventory Database  Ecoivent ELCD  Input Output Database  USLCI
Umberto LCA+ (Alemanha)	Programa foi desenvolvido pela Ifu Hamburg e serve para gerir e fazer uma análise do fluxo de materiais. Apenas depois de reunidas as informações sobre o fluxo de materiais e a energia gasta na empresa pode usufruir-se de todo o potencial deste software (Hamburg, 2019).	Ecoivent  GaBi Database

Dos programas referidos anteriormente, o SimaPRO e o One Click LCA têm licenças de utilização para um período finito, logo são descartadas para este estudo. O programa BEES é utilizado como suporte na determinação da escolha dos materiais a utilizar. Entre os programas GaBi, OpenLCA e Umberto LCA+, o que se mais adequa ao presente estudo é o OpenLCA, sendo que também, entre estes três últimos programas, é aquele que tem uma mais alargada base de dados.

## 2.2. Argamassa de Reboco

### 2.2.1. Descrição Geral e Caracterização de Argamassas

Desde há muito tempo que as argamassas têm sido usadas como material de construção, em edifícios antigos com soluções construtivas à base de alvenarias de pedra e mais recentemente em soluções construtivas à base de alvenaria de tijolo (Faria, 2012). Uma argamassa pode ser definida como a resultante da mistura de vários materiais, tais como, agregados, um ou mais ligantes, água, aditivos e adjuvantes, sendo que os últimos dois constituintes foram incorporados à sua constituição mais recentemente. As argamassas são dos produtos mais utilizados em construção civil e podem ser classificadas de duas formas distintas (Almeida, 2010). Quanto à sua finalidade e quanto ao tipo de ligante. Relativamente à sua finalidade, existem:

- Argamassa de assentamento;
- Argamassa de revestimento;
- Argamassa para tratamento de juntas;
- Argamassa de colagem;
- Argamassa de regularização/forma.

As argamassas podem ser classificadas quando ao tipo de ligante em argamassas de ligante mineral, argamassas de ligante sintético e ainda argamassas de ligante misto. As argamassas de ligante mineral podem ainda ser divididas de acordo com os seguintes tipos de ligante mineral (Veiga & Faria, 1990):

- Cimento
- Cal hidráulica
- Cal Aérea
- Gesso
- Bastarda

Segundo a norma NP EN 998-1:2017 (IPQ, 2017), as argamassas de reboco podem ser classificadas quanto à sua conceção, quanto ao seu processo produtivo e quanto às suas propriedades e/ou uso, como ilustra a Figura 2.7.

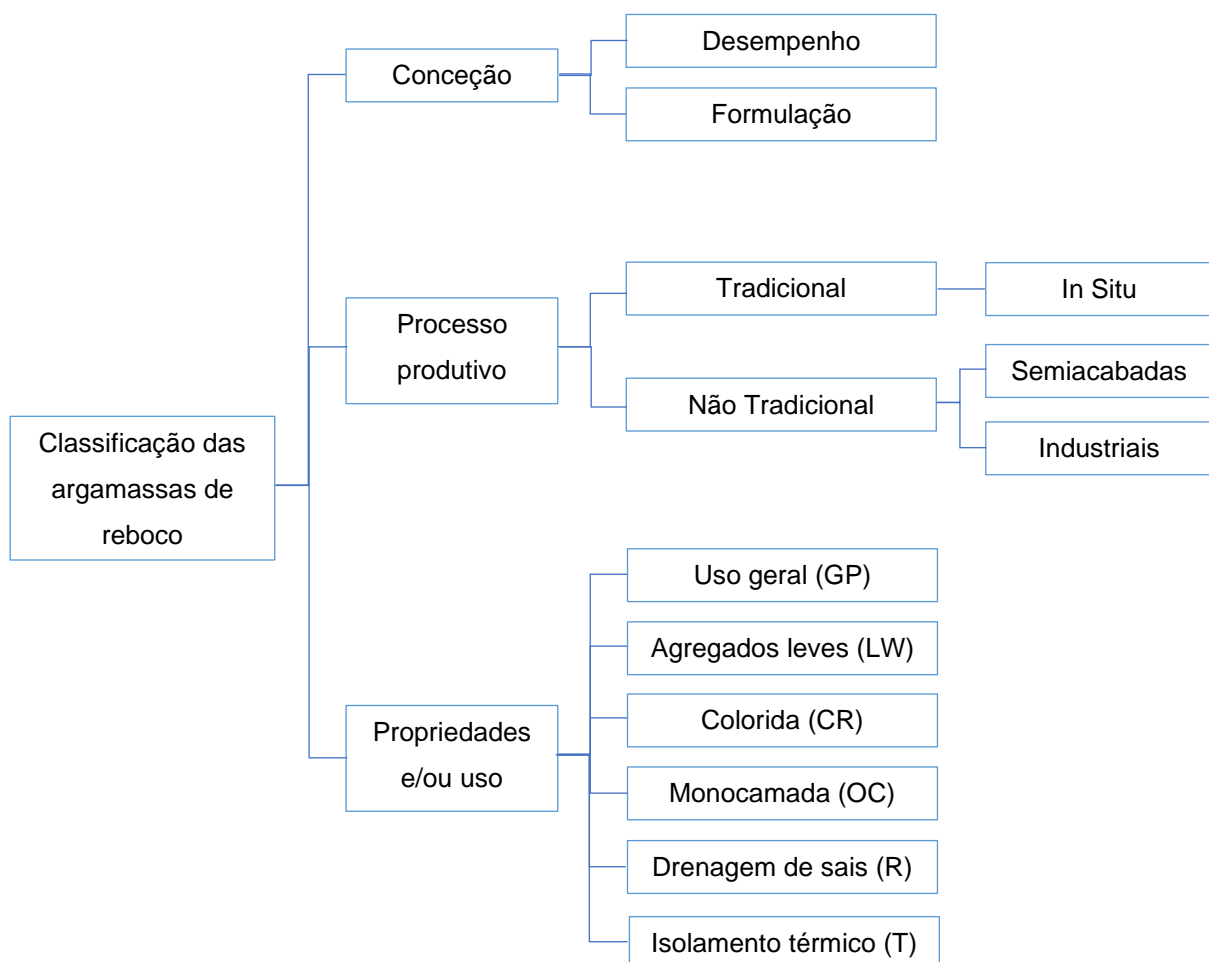


Figura 2.7 - Classificação das argamassas de reboco segundo a norma NP EN 998-1:2017

Podem também classificar-se estes revestimentos em função da sua aplicação, como por exemplo, para exterior, interior ou teto.

As argamassas de reboco têm como objetivo servir de primeira proteção ao suporte que revestem. As argamassas podem ser aplicadas em três fases distintas, o crespido, a camada base e a camada de acabamento, sendo que a quantidade de ligante nas argamassas destas fases decresce respectivamente. O crespido serve para aumentar a aderência da argamassa ao suporte e reduzir a absorção de água do suporte em relação à argamassa. A camada base garante ao suporte a sua verticalidade, planeza e regularidade. Esta camada é também muito importante pela impermeabilidade que oferece ao suporte. A camada de acabamento confere ao suporte resistência ao choque e é igualmente importante para a impermeabilização do suporte. Esta última camada confere ao suporte um perfil estético em termos visuais (Veiga & Faria, 1990).

## 2.2.2. Constituintes das Argamassas e o seu Processo Produtivo

### Produção do Cimento

O cimento é um ligante hidráulico que quando misturado com água, forma uma pasta que ganha presa e endurece, mesmo debaixo de água, por consequência de reações químicas e processos de hidratação e que depois de endurecer conserva as suas resistências mecânicas (IPQ, 2012). O cimento pode ser misturado, para além da água, com areia para fazer argamassa. Caso sejam ainda adicionados agregados grossos, obtém-se um betão.

A produção do cimento é feita essencialmente a partir de calcário e argila. O processo da produção de cimento é representado na Figura 2.7, em que:

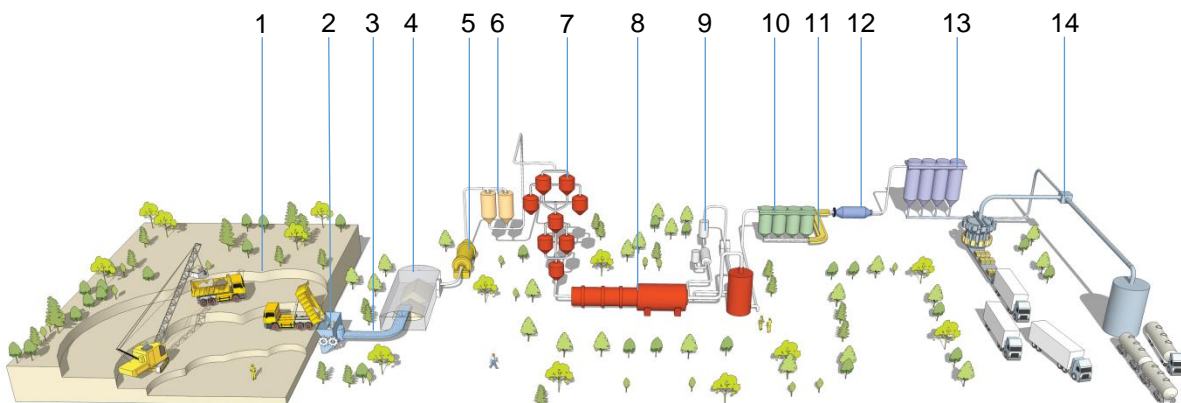


Figura 2.8 - Esquema do processo de produção de cimento (Secil, 2013)

- Pedreira (1 e 2);
- Preparação do cru (3, 4, 5 e 6);
- Produção de clínquer (7, 8 e 9);
- Moagem do cimento, embalagem e expedição (10, 11, 12, 13 e 14).

1. O calcário, argila e outras matérias primas são obtidas da natureza com recurso a perfuração e desmonte por explosivos ou por mineração mecânica de superfície.

**2.** O material extraído com uma dimensão máxima de 100 centímetros é britado através de um britador de impacto ou de maxilas, para que a sua dimensão se reduza até ficar com uma dimensão máxima entre 3 e 4 centímetros (Coutinho, 2006).

**3.** O material britado é transportado até à fábrica de cimento por meio de uma tela transportadora, de transporte terrestre, como comboios ou camiões, ou até de transporte fluvial, tendo em conta a que distância se encontra a fábrica do local de extração dos materiais.

**4.** O calcário e as margas são misturados e pré-homogeneizados em proporções adequadas, sendo acrescentados materiais para correção da composição química, tais como areia siliciosa, óxido de ferro e bauxite. Esta mistura, é designada por cru, é depositada por camadas e armazenada em local coberto.

**5.** O cru, com uma dimensão máxima de 3 a 4 cm, é introduzido num moinho vertical ou num moinho de bolas, onde sofre uma secagem e uma redução acentuada da sua dimensão até se formar um pó. Antes do cru entrar no moinho pode ocorrer ou não uma última correção química do cru.

**6.** O pó é homogeneizado e armazenado em silos de homogeneização até entrar no processo de cozedura (Secil, 2003).

**7.** O material passa numa torre, onde sofre um pré-aquecimento, a descarbonatação e inicia-se a pré-calcificação. A temperatura dentro da torre varia entre 400 °C e 900 °C, desde o topo ao fundo respetivamente. As poeiras provenientes dos circuitos de gases, do forno e de exaustão do moinho do cru, são removidas através de ventiladores juntamente com filtros de manga ou electrofiltros de grandes dimensões. A quantidade de material que chega no fundo da torre é apenas dois terços do material que entra no topo da torre, sendo a outra parte transformada em CO<sub>2</sub>.

**8.** A parte do material que atinge o fundo da torre entra no forno e ao longo do caminho sofre várias reações químicas que dão origem no final do forno a um produto chamado de clínquer. Estes fornos têm um comprimento aproximado de 80 metros e no seu interior o material consegue atingir temperaturas de 1450 °C, por ação de uma chama que atinge 2000 °C. O clínquer entra nos arrefecedores, com cerca de 20 metros de comprimento, para arrefecer rapidamente até uma temperatura entre 100 e 200 °C.

**9.** O clínquer arrefecido é depois transportado e armazenado num silo fechado ou numa área a céu aberto (Cimpor, 2019; Coutinho, 2006; Secil, 2003).

**10.** Antes de entrar no processo de moagem do cimento, as adições a serem utilizadas nesse processo são armazenadas em silos fechados. Estas adições podem ser de vários materiais tais como por exemplo, gesso, cinzas volantes, escórias de siderurgia e calcário.

**11.** O clínquer armazenado é transportado juntamente com as adições já mencionadas anteriormente, através de telas transportadoras até ao local onde ocorre a moagem do cimento. **12.** O clínquer é moído com cerca de 5% de gesso e com as outras adições perfeitamente doseadas. Existem vários tipos de cimento consoante as proporções de clínquer e de outras adições utilizadas no processo de moagem de cimento.

**13.** Depois da moagem os vários tipos de cimento são armazenados em diferentes silos antes de seguirem rumo ao último processo.

**14.** Finalmente, o cimento proveniente dos silos é ensacado e as embalagens de cimento são colocadas em paletes de madeira ou dentro de pacotes de plástico retráctil. O cimento é carregado e expedido através de vários tipos de transporte (rodoviário, ferroviário, fluvial ou marítimo), tendo em conta a localização e infraestrutura da fábrica (Secil, 2003). O cimento pode ainda ser expedido a granel através de transporte próprio para esse efeito, como por exemplo os camiões-cisterna. O cimento produzido de acordo com a norma EN 197-1 designa-se por cimento CEM. A mesma norma contempla 27 produtos da família dos cimentos correntes e que são divididos em 5 tipos. Esses tipos são CEM I (cimento Portland), CEM II (cimento Portland composto), CEM III (cimento de alto forno), CEM IV (cimento pozolânico) e CEM V (cimento composto). A notação dos 27 produtos de tipos de cimento corrente está de acordo com as percentagens de clínquer e de adições presentes na constituição do cimento. As adições que existem são escória de alto forno, sílica de fumo, pozolana natural, pozolana natural calcinada, cinza volante siliciosa, cinza volante calcária, xisto cozido e calcário.

### **Produção da Areia**

Os agregados podem ser classificados em grossos, se ficarem retidos no peneiro nº 4 ou abertura de malha 4,75 mm segundo a classificação ASTM, ou pelo contrário serão classificados de finos caso passem por esse mesmo peneiro (Coutinho, 2006; Veiga & Faria, 1990). Os agregados podem ainda ser classificados quanto à sua origem, podendo ser naturais, industrializados ou reciclados, e quanto à sua massa volúmica, sendo que podem ser leves, normais ou pesados. A areia é um agregado muito usado na construção como matéria-prima de produtos como a argamassa ou o betão (Faria, 2012). Por sua vez a areia não é um recurso renovável visto não ser gerada a uma escala que possa sustentar a sua taxa de consumo.

A atividade de extração de areia é muito importante para o desenvolvimento económico e social do país. Contudo, a sua exagerada exploração acarreta muitos problemas ambientais e prejudica a qualidade da água, do solo e do ar, a fauna e a flora (Librelotto & Jalali, 2008). Existe legislação para esta atividade, o Decreto-lei nº10/2010 de 4 de Fevereiro, que visa a gestão de resíduos provenientes na exploração de agregados (MAOTDR, 2010). Nos últimos anos, começa a haver uma preocupação maior com o controlo e avaliação da exploração de areia por causa da compreensão sobre os efeitos nefastos desta atividade em ambientes aquáticos e terrestres, que muitas vezes é a causa de acidentes



que infelizmente acontecem, como por exemplo a ponte em Entre-os-Rios que colapsou ou a estrada de ligação entre Borba e Vila Viçosa que desabou, casos já mencionados no capítulo 1.

Antes de qualquer exploração de agregados, é imperativo uma primeira avaliação geológica a fim de descobrir qual a melhor localização para a exploração. Este primeiro estudo é auxiliado por imagens de satélite, mapas topográficos, fotografias aéreas, relatórios de engenharia e estudos geofísicos (DGEG, 2016).

Concluída a avaliação, é escolhido o local para se proceder à extração do agregado. Para esta fase de exploração são usadas retroescavadoras, para retirar amostras do solo e camiões com brocas perfurantes para retirar amostras a maior profundidade. As explorações de recursos naturais, como é o caso dos agregados naturais, podem ser prejudiciais para o ambiente, pondo em causa a paisagem. Na década de 60, onde houve um grande crescimento na área da construção, muitas fontes de agregado foram esgotadas e cercadas por construções (Langer, 1993). Hoje em dia, muitas dessas explorações que não foram devidamente encerradas constituem um grande risco para as populações que habitam próximo desses locais. No local da exploração são construídas vias de comunicação e infraestruturas para o bom funcionamento da exploração. A fase da extração começa com a retirada de solo orgânico até a areia, a pedra e o cascalho estarem visíveis (Langer, Drew, & Sachs, 2004).

A areia e o cascalho são extraídos em explorações de duas formas distintas, a céu aberto e em subterrâneo. Em Portugal, nas explorações a céu aberto existe duas técnicas possíveis, flanco de encosta ou corta (abaixo da superfície) (IGM, 1999) Estes dois métodos de desmonte a céu aberto podem ser representados na Figura 2.9 e na Figura 2.10.



Figura 2.9 - Método de desmonte: Flanco de encosta, simplificação à esquerda (IGM, 1999) e fotografia à direita (Nunes, 2010)

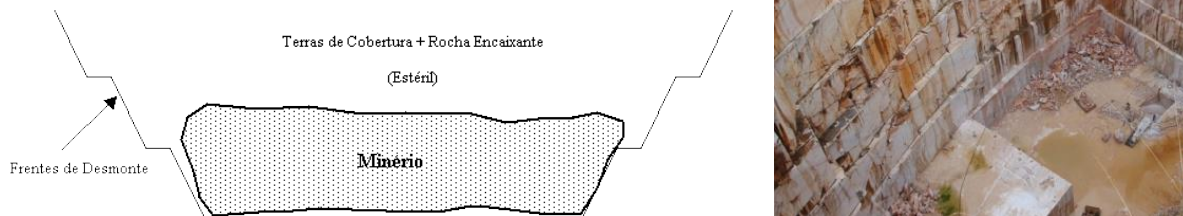


Figura 2.10 - Método de desmonte: Corta (abaixo da superfície), simplificação à esquerda (IGM, 1999) e fotografia à direita (Nunes, 2010)

Algumas técnicas de exploração em subterrâneo como desmonte com entulhamento, com desabamento e com abandono de pilares, são pouco utilizadas em Portugal (Nunes, 2010). A técnica mais utilizada em Portugal em explorações subterrâneas é a Câmara e Pilares, representada na Figura 2.11.



Figura 2.11 - Método de desmonte: Câmara e Pilares (Nunes, 2010)

Existe ainda uma outra forma de extrair areia, e bem mais rentável, que é a extração de areia dos leitos dos rios. Esta técnica também acarreta problemas ambientais, tais como a erosão dos solos. No caso das britas, o processo de extração difere do da areia e do cascalho, na medida em que é feito através de explosivos em pequenos buracos feitos previamente na rocha que produzem pequenas explosões em sequência em intervalos na ordem das milésimas de segundo.

Os materiais devem ser secos antes de se proceder ao seu processamento, representado na Figura 2.12. O processamento inicia-se com o transporte do material rochoso para uma central. Na central, o material rochoso é triturado, passando por vários britadores em separado. Após este processo, o material passa por um crivo vibratório, onde é separado e organizado por dimensões (granulometrias). O material, cujas dimensões não estejam dentro dos limites pretendidos é novamente colocado nos britadores e um novo processo inicia-se, sendo que o material que esteja dentro dos limites aceitáveis pode ser transportado para o armazém depois de ser lavado (Langer et al., 2004).



Figura 2.12 - Processamento dos agregados (NBM&CW, 2019)

O material depositado pode ser distribuído até ao destino final através de vários transportes terrestres e marítimos. O transporte mais utilizado é o camião, embora em algumas situações o comboio seja o transporte mais económico (Langer et al., 2004). Depois da venda do agregado, a escolha do transporte depende do local onde se encontra a construção e dos meios de transporte disponíveis localmente, assim como das vias de comunicação.

### Produção dos Resíduos de Madeira

De acordo com a norma EN ISO 17725-2:2014, os pellets de madeira são um biocombustível sólido granulado produzido a partir de biomassa florestal e de resíduos resultantes de processamento do material com ou sem aditivos (Carvalho, 2011; CEN, 2014). Os pellets de madeira são fabricados segundo a mesma norma e consistem em resíduos de madeira previamente secos, até um teor de humidade inferior a 10%, que sofrem uma compactação a pressões altas (CEN, 2014).

Segundo o Decreto-Lei nº178/2006 de 5 de setembro, a biomassa florestal é definida como a matéria vegetal proveniente da silvicultura e dos desperdícios de atividade florestal, incluindo apenas o material resultante das operações de condução, nomeadamente de desbaste e de desrama, de gestão de combustíveis e da exploração dos povoamentos florestais, como ramos, bicadas, cepos, folhas, raízes e cascas (D.R.E 2006). Pela mesma norma, os resíduos de madeira não podem ser usados como biomassa se conterem compostos orgânicos halogenados ou metais pesados resultantes de tratamento com conservantes ou revestimento, incluindo, em especial, resíduos de madeira provenientes de obras de construção e demolição.

Apesar de neste estudo ser dissecado o processo completo da pelletização, para efeitos práticos o que interessa extrair deste sistema não são os pellets de madeira propriamente ditos mais sim os resíduos de madeira com uma granulometria extensa, que antecedem o processo da pelletização propriamente dita, após a trituração e a secagem do material. Estes resíduos de madeira têm de ter uma dimensão máxima de 4,75 mm, para que fiquem com a dimensão de uma areia.

A inclusão dos resíduos de madeira nas argamassas de reboco, em substituição da areia, provoca uma alteração nas propriedades químicas, físicas e mecânicas, tanto no estado fresco como no estado endurecido. Pode-se esperar que estas argamassas tenham uma menor massa volúmica e, conseqüentemente, sejam mais leves e com uma menor condutibilidade térmica. Em contrapartida, a madeira, em comparação com a areia, tem um maior poder de absorção de água, pelo que as argamassas irão requerer mais quantidade de água para que tenham a mesma trabalhabilidade que as argamassas de reboco correntes. Devido à substituição da areia por resíduos de madeira, as argamassas produzidas deverão ter uma resistência mecânica menor do que as argamassas correntes (Martinho, 2017).

O processo completo da pelletização engloba várias fases, nomeadamente: a receção da matéria-prima, a moagem e secagem, a pelletização, o arrefecimento, o armazenamento e distribuição (Sá, 2009). A matéria-prima dos pellets é madeira virgem na forma de toros, sobras de cortes, de aparas e de serradura, provenientes da indústria transformadora, sendo geralmente de pinho e eucalipto (Carvalho, 2011). Os toros de madeira são extraídos das florestas enquanto que as sobras de corte, a serradura e as aparas são provenientes da indústria transformadora da madeira (Mantha, Monteiro, & Rouboa, 2013).

Na Figura 2.8 está representado o processo completo da produção de pellets de madeira, em que:

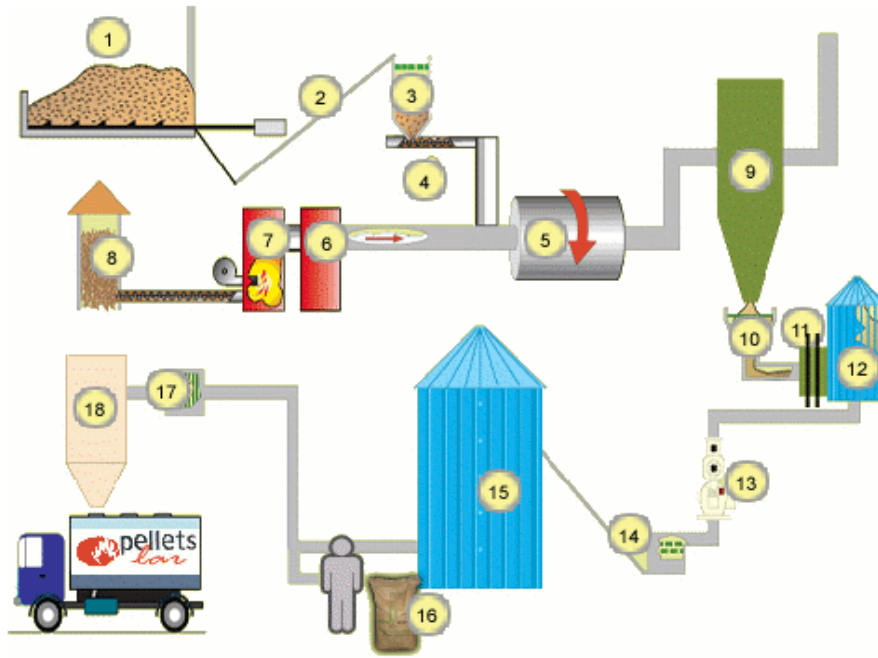


Figura 2.13 - Processo da produção de pellets de madeira (Sá, 2009)

- 1- Depósito de recepção de serradura;
- 2- Sem-fim de transporte de resíduos;
- 3- Filtro de resíduos primário;
- 4- Válvula estrela de regulação;
- 5- Secador rotativo a biomassa;
- 6- Recuperação de cinzas;
- 7- Queimador;
- 8- Silo de alimentação do queimador;
- 9- Separador ciclónico de vapor/serradura;
- 10- Filtro de resíduos secundários;
- 11- Refinador com crivo;
- 12- Mini-silo de serradura;
- 13- Compactador de pellets;
- 14- Sistema de refrigeração;
- 15- Silo do produto acabado (pellets);
- 16- Ensacadora de pellets com balança;
- 17- Vibrador e limpeza de partículas;
- 18- Silo de carga do produto acabado (pellets).

Posteriormente, os toros de madeira são descascados (a casca originaria um maior teor de cinzas) e triturados através de um destroçador de rolaria até uma dimensão máxima de 4,75 mm, para que fique do tamanho de uma areia. A madeira proveniente da limpeza de terrenos, como por exemplo de florestas, é triturada através de um triturador de biomassa, para produção de biomassa para queima

com a finalidade de produção de calor na fase de secagem. As aparas de madeira já trituradas são moídas através de moinhos de martelos, como o apresentado na Figura 2.14 (First, 2013c), até ficarem de uma dimensão idêntica à da serradura (Carvalho, 2011; EUBIA, 2009).



Figura 2.14 – Moinho de martelos (First, 2013c)

A seguir, o material sofre uma secagem para reduzir o teor de humidade. O material deve ter um teor de humidade entre 8% e 12%, para não ocorrerem fenómenos como a desintegração dos pellets ou a carbonização do material. A serradura passa por um secador de tambor rotativo, representado na Figura 2.15 (First, 2013d), que é alimentado pela biomassa proveniente do destrocador de biomassa como indicado anteriormente, e gera calor suficiente para evaporar a água contida na serradura para o ambiente. A fase da secagem é onde existe o maior gasto de energia na produção de pellets. Após a secagem é feita uma nova moagem para homogeneizar a granulometria da serradura (Carvalho, 2011; EUBIA, 2009).



Figura 2.15 - Secador de tambor rotativo (First, 2013d)

Depois da serradura estar homogeneizada, realiza-se o processo da pelletização através de uma prensa apresentada na Figura 2.16 (First, 2013b). A pelletização consiste em prensar, com alta pressão, o material através de uma matriz cónica perfurada com orifícios circulares de diâmetro de 6 ou 8 mm. A serradura tem de ser previamente aquecida até uma temperatura entre 120 °C e 130 °C, pois a essa temperatura a lignina, um dos constituintes da madeira, torna-se mais plástica e ajudará na aglutinação

das partículas de madeira na pelotização e após o seu arrefecimento, não necessitando assim de qualquer produto ligante. Depois do material sair da matriz cônica em forma de cilindros, estes são cortados nas dimensões pretendidas.



Figura 2.16 - Prensa (First, 2013b)

De seguida, é feito o arrefecimento, através do arrefecedor representado na Figura 2.17 (First, 2013a), onde as ligações entre as partículas de madeira ficam mais fortes devido ao arrefecimento da lignina e os pellets consequentemente endurecem. O teor de humidade também baixa, sendo que o teor de humidade dos pellets após o processo completo da pelotização deverá ficar entre 8% e 10% (Carvalho, 2011; EUBIA, 2009).

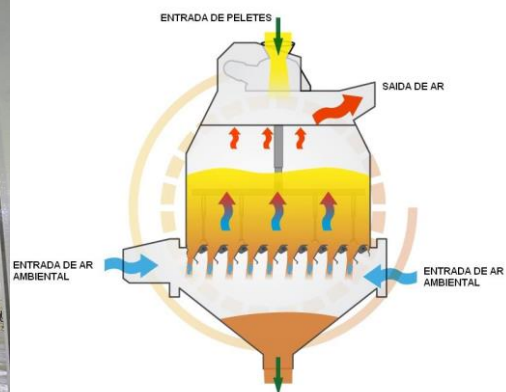


Figura 2.17 - Sistema de arrefecimento: Arrefecedor (à esquerda) e Diagrama de funcionamento (à direita) (First, 2013a)

Por fim, o material arrefecido é armazenado em silos quando é para venda a granel, em locais com uma humidade relativa baixa e controlada, podendo também ser embalado em sacos de 15kg, 500kg e 1000kg para distribuição (Barros, 2013; EUBIA, 2009).

### **2.3. Prevenção de Resíduos**

O sector da AECO é responsável por 50 % do consumo das matérias-primas e 42 % de energia a nível mundial, assim como por 30 % emissões de carbono para atmosfera, sendo também responsável pela produção de 25% a 30% de resíduos na Europa (Braga, Silvestre, & de Brito, 2017). A má gestão dos resíduos pode levar a riscos para a saúde pública e para o ambiente, e por isso tem havido uma maior preocupação com este assunto. É muito importante haver métodos para evitar a poluição da água, do solo, do ar, a contaminação da fauna e da flora, e os danos na paisagem. Antes de qualquer medida de prevenção, deve-se procurar sempre a otimização no fabrico de produtos e na produção de resíduos, para tornar o processo mais ecológico e sustentável (Ministério do Ambiente, 2006). A gestão dos resíduos é regulada pelo regime geral da gestão de resíduos aprovado pelo Decreto-Lei nº 178/2006, de 5 de setembro, é alterado pelo Decreto-Lei nº 73/2011, de 17 de junho. (MAOTDR, 2006, 2011).

#### **2.3.1. Reciclagem**

A reciclagem consiste em qualquer intervenção através da qual os diferentes resíduos provenientes de várias indústrias sofrem uma nova transformação que resulta em substâncias, produtos ou materiais com a sua função original ou ganhando uma nova função (MAOTDR, 2006, 2011). Inclui o reprocessamento de material, sendo que a recuperação de energia e as operações de aterro não estão incluídas (CE, 2008). Para tornar o sector da AECO mais sustentável, é comum utilizar os seus resíduos nas argamassas como forma de reciclagem. Estas adições podem-se traduzir em melhorias ou piorias nas propriedades físicas, químicas e mecânicas, as quais são refletidas na qualidade final da argamassa. Para escolher a reciclagem face a outras opções de operações de valorização, é necessário ter-se em conta o que é que o resíduo, após reciclado, vai substituir, se o processo de reciclagem é eficiente em relação à quantidade de material que existe para reciclagem e que se possa perder durante o processo, a quantidade de energia que é precisa no processo, e por fim e não menos importante, a distância que se encontra a fonte de resíduos da fábrica de reciclagem (Ribeiro, 2012).

#### **2.3.2. Aterro**

Por vezes não é possível aplicar ao resíduo uma operação de valorização, pelo que é inevitável recorrer a uma operação de eliminação do resíduo (CE, 2008). Uma dessas operações consiste no depósito dos resíduos no solo, em profundidade ou à superfície, como por exemplo em aterros. Esta poderá mesmo ser uma solução mais benéfica para o ambiente em relação à reciclagem ou outras formas de valorização, em que o reprocessamento e o transporte poderão significar encargos ambientais acrescidos. Em Portugal, existe uma legislação para a deposição de resíduos, o Decreto-Lei nº 183/2009, de 10 de Agosto (MAOTDR, 2009).



### **3. AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA - OpenLCA**

#### **3.1. Considerações Iniciais**

O OpenLCA é um software de código aberto para a avaliação do ciclo de vida e avaliação de sustentabilidade. O programa foi criado pela empresa GreenDelta em 2006 (GmbH, 2017, 2018), que fornece suporte, dados e desenvolvimento adicional para tornar o programa o mais atualizado possível. O programa está disponível gratuitamente e sem quaisquer custos de licença, sendo que qualquer utilizador pode ver e alterar o código fonte. Este software pode ser utilizado com vários fins, tais como:

- Avaliação do ciclo de vida (ACV)
- Custo do ciclo de vida (CCV)
- Avaliação do ciclo de vida social (ACVS)
- Pegadas de carbono e de água
- Declaração ambiental do produto (DAP)
- Agência de proteção ambiental dos Estados Unidos da América (APAEUA) etiqueta de design para o ambiente
- Política integrada de produtos (PIP)

Em 2012, a GreenDelta criou um repositório online de base de dados de ACV dos mais diversos processos, onde se podem encontrar bases de dados gratuitas ou pagas. Estes conjuntos de dados podem ser facilmente importados para o software OpenLCA. O repositório online combina os dados oferecidos pelos líderes mundiais de fornecimento de dados para ACV, tais como o Ecoinvent Centre (base de dados ecoinvent), PE International (base de dados GaBi), e o Joint Research Centre da Comissão Europeia (base de dados ELCD) (GmbH, 2017).

#### **3.2. Objetivo e Âmbito da Avaliação**

Esta dissertação pretende comparar uma argamassa corrente com várias formulações de argamassas com resíduos de madeira, neste caso proveniente de pellets de madeira. O objetivo consiste em encontrar uma composição de uma argamassa com resíduos de madeira que melhor responda à relação entre as suas características físicas e mecânicas, e minimize o impacte ambiental causado na sua produção.

O estudo a realizar consiste na avaliação do ciclo de vida de várias argamassas de reboco, desde a extração das matérias-primas até à sua aplicação em obra. Esta avaliação é feita com recurso ao software OpenLCA e destina-se a mostrar que existe uma grande vantagem, em termos de sustentabilidade, em se utilizarem argamassas com estes resíduos face às argamassas formuladas com agregados correntes. Note-se que poderá existir um certo receio por parte do mercado

relativamente a este tipo de argamassas por serem relativamente novas, o que fomentou a realização deste estudo.

### 3.2.1. Unidade Funcional

A unidade funcional que se assumiu para o estudo foi 1 kg de argamassa de reboco aplicado em obra em Portugal.

### 3.2.2. Fronteira do Sistema

As várias fases que foram consideradas na avaliação do ciclo de vida das argamassas de reboco com resíduos de madeira são: a produção de cimento, a produção de areia, a produção de resíduos de madeira e a produção da argamassa. O esquema das fases mencionadas pode ser visualizado na Figura 3.1.

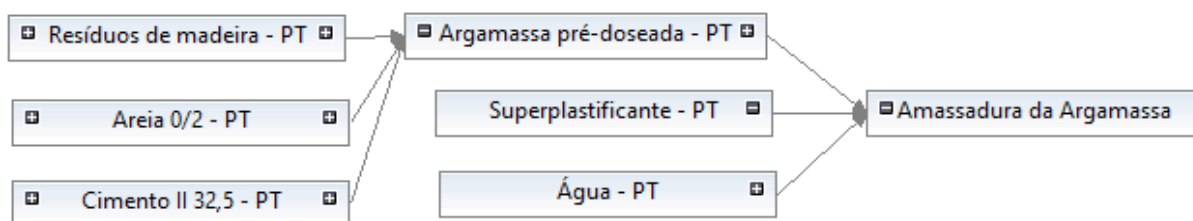


Figura 3.1 - Esquema do sistema de produto da argamassa utilizada, modelado no software OpenLCA

### 3.2.3. Descrição dos Dados

A base de dados selecionada para este trabalho foi a base de dados *ELCD*, que se encontrava disponível gratuitamente no repositório online e foi importada para o software. Os dados referentes ao cimento são provenientes da dissertação de Pato (2015), pois na base de dados já referida apenas se encontravam dados relativos a cimento CEM I, sendo que o presente estudo se refere a cimento CEM II. Os dados relativos aos resíduos de madeira são do Instituto de Avaliação Tecnológica e Análise de Sistemas (ITAS) localizado na Alemanha. Por fim os dados que dizem respeito à areia são provenientes da Thinkstep AG, uma empresa alemã.

### 3.2.4. Pressupostos Assumidos

As composições utilizadas neste trabalho, tiveram como base as argamassas estudadas no âmbito da investigação desenvolvida por Martinho (2017). A escolha do cimento como ligante prende-se com o facto de existir na literatura informação alusiva à produção de cimento do tipo CEM II/B-L 32,5N, a qual foi usada como inputs associados ao processo da produção de cimento. A areia utilizada no trabalho referido anteriormente envolveu três tipos diferentes, APAH 12, APAH 20 e a APAH 30, da empresa AREIPOR – AREIAS PORTUGUESAS, LDA, sendo que para esta avaliação as três areias referidas atrás foram apenas contabilizadas como um único tipo de areia com a mínima e máxima dimensão das (d/D) partículas, em milímetros, de 0/2, devido a ser a única areia com dados de ACV encontrados no

repositório online e pelo facto desses dados também serem gratuitos. Para os resíduos de madeira conseguiram-se encontrar dados bastante completos, mas desmontou-se o processo de produção retirando a última fase, a fase da pelletização, pois o que verdadeiramente se usa na composição destas argamassas são as partículas de madeira com uma granulometria extensa, que são usadas no processo da pelletização. Estas partículas de madeira utilizadas têm a dimensão d/D, em milímetros, de 0,25/4,75. As bariedades utilizadas nos cálculos dos materiais areia, cimento e resíduos de madeira são de 1611,5 Kg/m<sup>3</sup>, 1187,7 Kg/m<sup>3</sup> e 542,3 Kg/m<sup>3</sup>, respetivamente. As massas volúmicas utilizada nos cálculos da água e do superplastificante<sup>1</sup> são de 1000 Kg/m<sup>3</sup> e 1200 Kg/m<sup>3</sup>, respetivamente (Martinho, 2017).

Nas composições destas argamassas considera-se um traço volumétrico ligante/agregado de 1/0,96. Primeiro que tudo foi preciso encontrar uma variação da relação água/ligante (a/l) em função da percentagem de areia a substituir que mais se aproximasse da variação da relação a/l proveniente do estudo de Martinho (2017), como se apresenta na Tabela 3.1, para se poder ter uma variada gama de argamassas. Os resultados dessa relação estão representados na Figura 3.2.

Tabela 3.1 - Relação água/ligante e percentagem de superplastificante (Martinho, 2017)

Argamassa	Resíduos de madeira (% substituição do volume da areia)	Relação a/l (-)	Superplastificante (% massa do ligante)
Mix 1	0	0,30	0,30
Mix 2	10	0,40	0,35
Mix 3	20	0,45	0,40
Mix 4	30	0,55	0,50
Mix 5	40	0,63	0,55

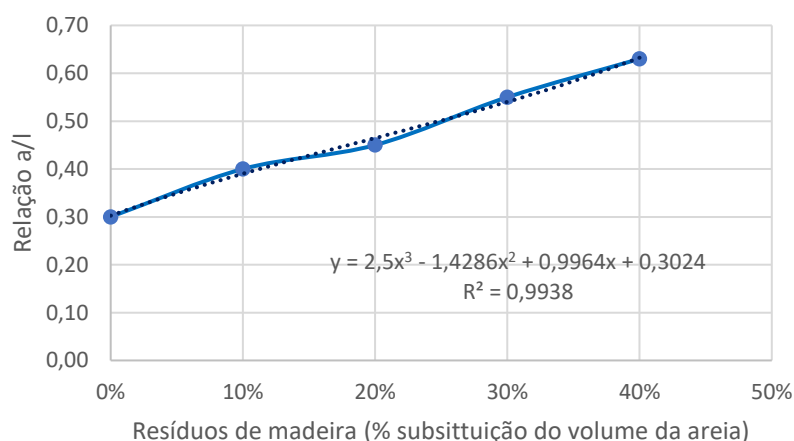


Figura 3.2 - Evolução da relação água/ligante em função da percentagem de areia substituída

<sup>1</sup> O superplastificante é um aditivo que se pode adicionar à argamassa para lhe oferecer melhores propriedades de trabalhabilidade.

De seguida, procedeu-se da mesma maneira para encontrar a melhor relação da percentagem de massa do ligante em superplastificante em função da relação a/l encontrada anteriormente. Os resultados dessa relação estão representados na Figura 3.3.

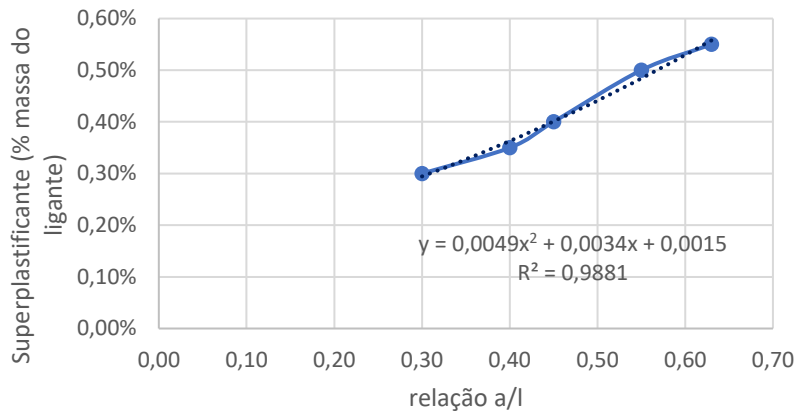


Figura 3.3 - Evolução da percentagem de superplastificante em função da relação água/ligante

Com as relações efetuadas procedeu-se aos cálculos para encontrar a relação a/l e a percentagem da massa do superplastificante em massa de ligante. A melhor relação a/l encontrada anteriormente é uma função polinomial de 3º grau, e com a equação dessa função polinomial calcularam-se as relações a/l das restantes argamassas. Da mesma maneira, calculou-se a percentagem da massa do superplastificante em massa de ligante para as restantes argamassas, sendo que neste caso a equação usada foi uma função polinomial de 2º grau. Verificou-se que as percentagens de superplastificante eram muito exageradas, pois no estudo de Martinho (2017) mostra que a variação relação a/l é muito semelhante à variação da percentagem da massa do superplastificante em massa de ligante, pelo que se procedeu a uma nova tentativa. Desta vez utilizou-se uma função polinomial de 2º grau na equação da relação a/l, sendo que no caso do superplastificante foi utilizada a mesma equação. Neste caso, verificou-se um comportamento contrário ao caso anterior. Destes dois casos foram extraídos os valores apresentados nas tabelas 3.2 e 3.3, em que se assumiu que a relação a/l que se mais adequava para uma situação real era a indicada na Tabela 3.2 e no caso do superplastificante assumiu-se a indicada na Tabela 3.3.

Esta hipótese assumida prende-se com o facto, já referido anteriormente, da variação relação a/l ser muito semelhante à variação da percentagem da massa do superplastificante em massa de ligante, como verificado no estudo feito por Martinho (2017), e também que as variações eram sempre maiores no caso da relação a/l.

Tabela 3.2 - Relação água/ligante (função polinomial de 3º grau) e percentagem de superplastificante (função polinomial de 2º grau)

Argamassas	Resíduos de madeira (% substituição do volume da areia)	Relação a/l (polinomial de 3º grau)	Superplastificante (% massa do ligante) (polinomial de 2º grau)
Argamassa 0% (Referência)	0	0,30	0,30
Argamassa 10%	10	0,39	0,36
Argamassa 20%	20	0,46	0,41
Argamassa 30%	30	0,54	0,48
Argamassa 40%	40	0,63	0,56
Argamassa 50%	50	0,76	0,69
Argamassa 60%	60	0,93	0,88
Argamassa 70%	70	1,16	1,20
Argamassa 80%	80	1,47	1,70
Argamassa 90%	90	1,86	2,49
Argamassa 100%	100	2,37	3,71

Tabela 3.3 - Relação água/ligante (função polinomial de 2º grau) e percentagem de superplastificante (função polinomial de 2º grau)

Argamassas	Resíduos de madeira (% substituição do volume da areia)	Relação a/l (polinomial de 2º grau)	Superplastificante (% massa do ligante) (polinomial de 2º grau)
Argamassa 0% (Referência)	0	0,31	0,30
Argamassa 10%	10	0,38	0,35
Argamassa 20%	20	0,46	0,41
Argamassa 30%	30	0,55	0,48
Argamassa 40%	40	0,63	0,56
Argamassa 50%	50	0,71	0,64
Argamassa 60%	60	0,80	0,74
Argamassa 70%	70	0,89	0,84
Argamassa 80%	80	0,98	0,95
Argamassa 90%	90	1,07	1,07
Argamassa 100%	100	1,16	1,20

Para simplificar, apresentam-se na Tabela 3.4 os resultados finais da relação água/ligante e da percentagem de superplastificante para todas das formulações alvo de análise.

Tabela 3.4 - Relação água/ligante e percentagem de superplastificante assumidos

Argamassas	Resíduos madeira (% substituição do volume da areia)	Relação a/l	Superplastificante (% massa do ligante)
Argamassa 0% (Referência)	0%	0,30	0,30%
Argamassa 10%	10%	0,40	0,35%
Argamassa 20%	20%	0,45	0,40%
Argamassa 30%	30%	0,55	0,50%
Argamassa 40%	40%	0,63	0,55%
Argamassa 50%	50%	0,76	0,64%
Argamassa 60%	60%	0,93	0,74%
Argamassa 70%	70%	1,16	0,84%
Argamassa 80%	80%	1,47	0,95%
Argamassa 90%	90%	1,86	1,07%
Argamassa 100%	100%	2,37	1,20%

Com esta etapa completa, conseguiu-se proceder ao cálculo das quantidades de cada material. Em relação ao superplastificante (SP), como não se encontram nenhuns dados online referentes à produção do mesmo, utilizaram-se os valores provenientes de um artigo científico (Braga et al., 2017). Os cálculos da quantidade de massa de material realizaram-se partindo de um volume de agregado de 1 m<sup>3</sup>, como mostra a Tabela 3.5, tendo sido depois realizados outros cálculos a fim de encontrar a quantidade de massa de material suficiente para que o total da massa de todos os materiais em conjunto seja igual a 1 kg, como se apresenta na Tabela 3.6.

Tabela 3.5 - Quantidade de materiais utilizados nas argamassas considerando 1m<sup>3</sup> de agregado

Argamassas	Quantidade considerando 1m <sup>3</sup> de agregado (kg)				
	Areia	Cimento	Resíduos de madeira	Água	Superplastificante
Argamassa 0% (Referência)	1611,500	1237,188	0,000	371,156	3,712
Argamassa 10%	1450,350	1237,188	54,230	494,875	4,330
Argamassa 20%	1289,200	1237,188	108,460	556,734	4,949
Argamassa 30%	1128,050	1237,188	162,690	680,453	6,186
Argamassa 40%	966,900	1237,188	216,920	779,428	6,805
Argamassa 50%	805,750	1237,188	271,150	935,252	7,949
Argamassa 60%	644,600	1237,188	325,380	1145,566	9,100
Argamassa 70%	483,450	1237,188	379,610	1431,879	10,362
Argamassa 80%	322,300	1237,188	433,840	1812,747	11,739
Argamassa 90%	161,150	1237,188	488,070	2306,729	13,237
Argamassa 100%	0,000	1237,188	542,300	2932,382	14,860

Nestes segundos cálculos a unidade funcional que se usou foi 1 kg de argamassa. O transporte dos materiais da argamassa para o local da obra não foi contabilizado, pois sendo um processo presente em todos os sistemas, não iria influenciar esta análise.

Tabela 3.6 - Quantidade de materiais utilizados para 1 kg argamassa

Argamassas	Quantidade de materiais para 1kg de argamassa (kg)				
	Areia	Cimento	Resíduos de madeira	Água	Superplastificante
Argamassa 0% (Referência)	0,500	0,384	0,000	0,115	1,1E-03
Argamassa 10%	0,448	0,382	0,017	0,153	1,34E-03
Argamassa 20%	0,404	0,388	0,034	0,174	1,55E-03
Argamassa 30%	0,352	0,386	0,051	0,212	1,92E-03
Argamassa 40%	0,302	0,387	0,068	0,244	2,12E-03
Argamassa 50%	0,248	0,381	0,083	0,288	2,44E-03
Argamassa 60%	0,192	0,369	0,097	0,342	2,71E-03
Argamassa 70%	0,137	0,350	0,107	0,405	2,93E-03
Argamassa 80%	0,085	0,325	0,114	0,476	3,07E-03
Argamassa 90%	0,038	0,295	0,116	0,550	3,15E-03
Argamassa 100%	0,000	0,263	0,115	0,622	3,14E-03

### 3.3. Análise de Inventário do Ciclo de Vida

Para a realização desta fase, foi preciso executar um esquema do sistema de produto e os respectivos limites, para determinar todos os processos do sistema, com todas as etapas necessárias à sua realização. Tendo em conta o objetivo da análise desta dissertação, foram realizados onze sistemas de produção (entenda-se onze argamassas diferentes). Estes sistemas são idênticos em todas as etapas do sistema, sendo apenas diferentes nas diferentes dosagens de resíduos de madeira em substituição por parte da areia na composição da argamassa. Na ACV da produção destas argamassas pré-doseadas em fábrica, as diferentes técnicas usadas, em todos os processos de cada sistema, são contabilizadas de acordo com a legislação de cada país. Todos os fluxos de saída que ocorrem em consequência dos processos mencionados neste subcapítulo e que irão contribuir para o impacto ambiental estão listados no Anexo I.

- Cimento

O processo da produção de cimento engloba todas as fases já detalhadas anteriormente no capítulo 2. A fase de perfuração e rebentamento consiste na extração de calcário e marga nas explorações perto da fábrica de cimento, através de cargas explosivas. A etapa da britagem é realizada através de um britador que reduz a dimensão dos blocos de pedra extraídos na fase anterior. A marga e o calcário são armazenados em silos, sendo que as matérias-primas secundárias são armazenadas em silos e armazéns próprios. A etapa moagem do cru consiste na calibração da composição química por adição de areia, óxido de ferro e outras matérias-primas secundárias. O cru é armazenado em silo, onde sofre uma homogeneização para garantir um bom produto final. A produção de cimento inclui um processo secundário que consiste na moagem de combustíveis alternativos, como plásticos e borrachas, para

utilização nos moinhos de carvão. Na etapa de cozedura do cru ocorre a clínquerização, para produzir o clínquer que é o constituinte principal do cimento. Esta etapa inclui ainda o arrefecimento do clínquer e o seu armazenamento. Na etapa da moagem do cimento, o clínquer é moído e misturado com gesso e aditivos inertes, como as cinzas volantes e escórias de alto-forno. A etapa final é o empacotamento e a expedição do produto final. O processo da produção do cimento inclui ainda o transporte da matéria-prima na fase da perfuração e rebentamento até ao britador, e na fase da expedição do produto final até aos principais postos comerciais, assim como todos os transportes internos realizados na fábrica. A produção de resíduos também é contabilizada neste processo (Pato, 2015).

- Resíduos de Madeira

A produção de resíduos de madeira considerados nesta dissertação foi explicada com mais detalhe no capítulo 2. As etapas deste processo tiveram por base todas as etapas usadas na indústria da pelotização, sendo que a única etapa que foi excluída foi a etapa da pelotização propriamente dita. O processo principal da produção de resíduos de madeira contém as etapas de extração de matéria-prima com picagem da madeira, moagem húmida, secador, moagem seca e armazenamento do material em silos de serradura. Para além do processo principal, contém ainda um processo secundário que consiste na produção de resíduos de madeira para alimentação da caldeira. O processo secundário inclui a colheita da biomassa, transporte de matéria-prima até à fábrica e a moagem no triturador de biomassa, sendo que toda a maquinaria usada também é mencionada. São assumidas perdas de 2% na colheita de matéria-prima. No transporte é usado o camião, sendo que a perda de material assumida é de 1%. A etapa de picagem de madeira, do processo principal, consiste no corte dos resíduos de madeira, provenientes das florestas e das indústrias da madeira e com uma dimensão muito grande, em aparas de madeira. A etapa da primeira moagem das aparas de madeira consiste numa moagem húmida das aparas num moinho de moagem, sendo que a perda de material assumida é de 1%.

Na etapa da secagem das aparas de madeira, os resíduos de madeira pré-triturados, provenientes da moagem húmida, são aplicados uniformemente numa passadeira rolante de secagem permeável ao ar. O ar ambiente é puxado de cima para baixo, através do exaustor, e passa através do permutador de calor e da camada de produto até sair para a atmosfera. Este ar, que é emitido para o ambiente, é em grande parte saturado com água. No final da linha de secagem, o material seco é transportado e distribuído para o separador ciclónico de vapor/serradura. No final do secador rotativo, a camada superior de material seco é retirada e a camada inferior é devolvida ao secador. Devido ao fluxo de ar, a camada inferior de material atua como um filtro que minimiza as emissões de poeira. A caldeira utilizada na etapa de secagem é alimentada por biomassa proveniente do processo secundário, produção de resíduos de madeira para alimentação da caldeira. A caldeira inclui ainda um recuperador de cinzas, onde as cinzas finas são transportadas para aterro como forma de eliminação e as cinzas grossas são transportadas para usinas de compostagem como forma de reciclagem. As produções do destroçador de rolaria, do armazém para a matéria-prima, do processo secundário e da caldeira são considerados neste processo (GmbH, 2019b, 2019a, 2019d, 2019c, 2019h, 2019e, 2019f).



As entradas desta etapa são os resíduos de madeira, a energia elétrica consumida pelo destroçador de rolaria e o óleo lubrificante usado na manutenção do triturador de biomassa. Os outputs são as aparas de madeira e o desperdício de madeira próprio do corte.

- Areia

O processo de produção de areia usado nesta dissertação encontrando-se descrito no capítulo 2. Este sistema engloba os processos de extração, britagem, transporte até à central, processamento e armazenamento do produto até à sua venda. O transporte da central aos principais postos comerciais de venda a granel destes agregados está incluído, sendo que o transporte diretamente da central ou do posto comercial até ao local da obra, após a venda final do agregado, não é contabilizado nesta avaliação, uma vez que a escolha do transporte é influenciada pelo local onde decorre a construção e os meios de transporte disponíveis próximos do local da venda. Na fase de processamento, a matéria-prima é submetida a uma preparação que consiste em várias etapas de lavagem do material com água limpa para separar o agregado de outros materiais como o barro ou a argila, e ainda outras impurezas como por exemplo madeira, caulinite, carvão ou metal. Em seguida, o material é classificado por tamanho em peneiros vibratórios ou outras máquinas para o mesmo fim, e o material mais grosso prossegue para uma segunda fase, onde é fragmentado através de adequados equipamentos seguida de crivagem e separação dos agregados por via húmida. A areia com teor de  $\text{SiO}_2$  superior a 96% é conhecida como areia de quartzo ou areia quartzosa. O sistema de produção de areia inclui também a geração de energia. A infraestrutura, a construção e instalação da central não são consideradas. A geração de energia funciona como um sistema em segundo plano em que a eletricidade e a energia térmica (como um subproduto) usadas são modeladas de acordo com a situação específica de cada país.

Em primeiro lugar, as centrais de produção de eletricidade são modeladas de acordo com a atual rede elétrica nacional. Em segundo lugar, os padrões nacionais de emissão e eficiência das centrais de produção de energia elétrica são também modelados. Em terceiro lugar, o empréstimo de combustível (parcela dos recursos utilizados, por importação ou oferta interna) específico de cada país é contabilizado. Em quarto lugar, os processos de importação, transporte, mineração e exploração da rede de empréstimos de fontes de energia são modelados de acordo com a situação específica de cada país produtor de energia elétrica e as fontes de energia para geração de eletricidade, assim como as quantidades de cada fonte de energia disponíveis, como por exemplo carvão, petróleo, gás natural, urânio, eólica e hídricas. Os produtos das refinarias, como gasóleo, gasolina, betumes (asfalto por exemplo), Gás de Petróleo Liquefeito (GPL), fuelóleo e óleos lubrificantes são modelados de acordo com o modelo de refinaria parametrizado específico de cada país (GmbH, 2019g).

As entradas deste processo são o agregado extraído, outros materiais e impurezas, e a eletricidade usada em todas as etapas do processo. A eletricidade não é contabilizada diretamente como energia elétrica, mas sim como todas as quantidades das fontes de energia usadas, assim como toda a

quantidade de desperdício dos recursos gerados, para produzir a totalidade da quantidade de energia elétrica gasta neste processo.

As saídas do processo são a areia, o desperdício de demolição da fase de extração de matéria-prima, o resíduo gerado na fase de processamento, outros resíduos gerados nas restantes fases do processo e todas as emissões libertadas para o meio ambiente.

- Amassadura da Argamassa

O processo da amassadura da argamassa é relativamente simples e rápido, pois estas argamassas com resíduos são normalmente pré-doseadas, sendo que apenas tem que se adicionar a água, e neste caso, um aditivo, o superplastificante. A formulação da argamassa foi referida anteriormente. O transporte, desde o ponto de compra destas argamassas pré-doseadas até ao portão da obra, não é contabilizado, sendo apenas contabilizado o transporte para adquirir os materiais da argamassa (cimento, areia e resíduos de madeira) até um local, neste caso a faculdade, onde é feito este estudo, admitindo hipoteticamente ser este o local onde se produzem e se comercializam estas argamassas. Os materiais de auxílio à amassadura também não estão contabilizados, assim como a eletricidade requisitada para esses materiais.

As entradas deste processo são o cimento, a areia, o resíduo de madeira e a água. O material superplastificante usado na amassadura da argamassa não foi contabilizado de acordo com as justificações anteriormente referidas.

A saída deste processo é apenas a argamassa já preparada, sendo que os desperdícios dos materiais utilizados na amassadura não foram também contabilizados.

### 3.4. Avaliação dos Impactes Ambientais

É importante a escolha das categorias de impacte ambiental que mais se adequam ao problema existente, para poder assim selecionar o método mais adequado. Tendo em conta esta abordagem, foi aplicada a versão 4.4 de janeiro de 2015 do método de avaliação do impacte ambiental CML *baseline*. Este método foi desenvolvido pela Universidade de Leiden, na Holanda, e inclui as seguintes categorias de impacte ambiental (Ferrão, 1998):

- Acidificação (A) – representa o processo de transformar uma substância numa substância ácida, ou seja, de baixar o seu pH. O potencial de acidificação (PA) representa a alteração do grau de acidez do solo, da água, de organismos e também de edifícios, sendo que este método apenas considera a acidificação provocada por SO<sub>2</sub> e NO<sub>x</sub>. A acidificação foi calculada pela expressão que se apresenta em seguida:

$$A_{kg\ SO_2\ equivalente\ (eq.)\ (kg)} = PA\ (média\ europeia)_{kg\ SO_2\ eq.} \times Emissão\ atmosférica_{(kg)}$$

- Aquecimento global (AG) – esta designação é utilizada para representar o aumento da temperatura global do planeta devido às emissões dos gases de estufa, provocados pela atividade humana, que absorvem a energia radiada pela Terra na atmosfera. O potencial de aquecimento global (PAG) representa a contribuição de qualquer substância para o efeito de estufa. Este potencial pode ser calculado para os períodos de 20, 100 ou 500 anos, tendo em conta que as substâncias podem levar anos para se decomporem totalmente. O valor de PAG de diversas substâncias pode ser facilmente encontrado em tabelas, sendo que para o CO<sub>2</sub> o seu valor é de 1. O valor referente ao aquecimento global foi calculado para 100 anos e a expressão apresenta-se em seguida:

$$AG_{(kg\ CO_2\ eq.)} = PAG_{100\ (kg\ CO_2\ eq.)} \times Emiss\tilde{a}o\ atmosf\acute{e}rica_{(kg)}$$

- Depleção do ozono estratosférico (DOE) – reproduz a destruição da camada de ozono devido à ação humana. Esta redução da espessura da camada de ozono facilita que a radiação ultravioleta atinja a superfície terrestre, o que para saúde humana é bastante prejudicial. O potencial de destruição do ozono (PDO) representa o efeito que cada substância tem na diminuição da camada de ozono. Neste caso, o valor de PDOE é 1 para a substância CFC-11. O valor referente à depleção do ozono estratosférico foi calculado pela expressão que se apresenta em seguida:

$$DOE_{(kg\ CFC-11\ eq.)} = PDOE_{\left(\frac{kg\ CFC-11\ eq.}{kg}\right)} \times Emiss\tilde{a}o\ atmosf\acute{e}rica_{(kg)}$$

- Depleção de recurso abióticos (DRA) – consiste na escassez de recursos minerais e energéticos devido à sua utilização insustentável. Esta categoria de impacte é influenciada pela quantidade de recursos disponíveis e pela taxa de extração desses recursos. Isto pode levar a um possível colapso no ecossistema. Esta categoria é dividida em duas componentes, a componente de materiais e a componente de energia. Neste caso, o valor do potencial de depleção de recursos abióticos na componente de materiais é 1 para a substância antimónio (Sb) e diferente de 1 para outras substâncias, e na componente de energia é o poder calorífico de cada material. O valor referente à depleção do ozono estratosférico foi calculado pela expressão que se apresenta em seguida:

$$DRA\ (materiais)_{(kg\ Sb\ eq.)} = PDRA_{materiais\ \left(\frac{kg\ Sb\ eq.}{kg}\right)} \times Consumo\ do\ recurso_{(kg)}$$

$$DRA\ (energia)_{(MJ)} = PDRA_{energia\ \left(\frac{MJ}{kg}\right)} \times Consumo\ do\ recurso_{(kg)}$$

- Eutrofização (E) – é a acumulação excessiva de nutrientes no solo ou na água, como os nitratos e fosfatos, que leva a alterações nos ecossistemas. Esta excessiva concentração de nutrientes promove por exemplo o crescimento de algas em rios que tem como consequências a redução da qualidade da água e das populações animais. O potencial de eutrofização (PE) é igual a 1

para a substância fosfato. A eutrofização foi calculada através da expressão que se apresenta em seguida:

$$E_{(kg\ PO_4^{-3}\ eq.)} = PE\ (genérico)_{\left(\frac{kg\ PO_4^{-3}\ eq.}{kg}\right)} \times Emissão\ atmosférica_{(kg)}$$

- Formação de ozono troposférico (FOT) – designa a formação de compostos químicos na troposfera, através de complexas reações químicas, das quais se destacam o ozono e o nitrato de peroxiacetil. O ozono é benéfico na zona da estratosfera, mas em grandes concentrações ao nível da troposfera é prejudicial para o ser humano e vegetações. Estes compostos químicos ocorrem nos locais com bastante incidência da luz solar, onde acontecem grandes quantidades de emissões atmosféricas de hidrocarbonetos e óxidos de azoto, provenientes principalmente de emissões automóveis ou industriais. O potencial de oxidação fotoquímica (POF) representa a capacidade potencial que uma substância orgânica volátil oferece para produzir ozono. A formação de ozono troposférico foi calculada através da expressão que se encontra em seguida:

$$FOT_{(kg\ etileno\ eq.)} = POF\ (NOx\ alto)_{\left(\frac{kg\ etileno\ eq.}{kg}\right)} \times Emissão\ atmosférica_{(kg)}$$

- Uso de recursos de energia primária (UREP) – consiste na utilização de energia primária proveniente de recursos renováveis, ou seja, que existe na natureza e cresce naturalmente, e da energia proveniente de recursos não renováveis, ou seja, podem existir na natureza, mas o seu processo de renovação não se encontra na escala de tempo humana. Esta categoria é dividida em duas componentes: a componente de recursos energéticos primários não renováveis e a componente de recursos energéticos primários renováveis. Neste caso, o valor do potencial de uso de recursos energéticos primários é o poder calorífico de cada material. O valor referente à utilização de recursos energéticos primários não renováveis foi calculado pela expressão que se apresenta em seguida:

$$UREP - NR_{(MJ)} = PUREP - NR_{\left(\frac{MJ}{kg}\right)} \times Consumo\ do\ recurso_{(kg)}$$

$$UREP - R_{(MJ)} = PUREP - R_{\left(\frac{MJ}{kg}\right)} \times Consumo\ do\ recurso_{(kg)}$$

#### 4. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados os resultados da ACV da produção das várias argamassas, com recurso ao *software OpenLCA* e com base nos indicadores de impacte ambiental escolhidos. Os métodos usados foram o método do Instituto de Ciências do Ambiente (CML) da universidade de Leiden, na Holanda, e o *Cumulative Energy Demand* (CED). Os resultados da aplicação dos métodos de impacte *CML baseline* e *CED* são apresentados para 1 kg de cada argamassa, 1 kg de cada material utilizado, para 1 kg-m de transporte e por categoria de impacte, para 1 kg de todas as argamassas e discriminadas pelos materiais utilizados. É feita ainda uma comparação entre todas as argamassas, nas diferentes categorias de impacte, para que se possa escolher qual a melhor argamassa a nível ambiental.

Na Tabela 4.1 são apresentados os resultados do impacte ambiental de cada uma das argamassas pelo método CML, tendo em conta 1 kg de argamassa.

Tabela 4.1 - Impacte ambiental das argamassas pelo método CML

Impacte ambiental das argamassas	Método						
	CML						
	DRA		AG	DOE	FOT	A	E
	kg Sb eq.	MJ	kg CO <sub>2</sub> eq.	kg CFC-11 eq.	kg etileno eq.	kg SO <sub>2</sub> eq.	kg PO <sub>4</sub> <sup>-3</sup> eq.
Argamassa 0% Referência	7,37E-07	2,69E+00	2,01E-01	1,20E-08	3,52E-05	1,37E-03	1,62E-04
Argamassa 10%	7,19E-07	2,63E+00	1,96E-01	1,17E-08	3,38E-05	1,34E-03	1,59E-04
Argamassa 20%	7,16E-07	2,62E+00	1,95E-01	1,16E-08	3,30E-05	1,34E-03	1,59E-04
Argamassa 30%	6,98E-07	2,56E+00	1,90E-01	1,13E-08	3,16E-05	1,31E-03	1,55E-04
Argamassa 40%	6,86E-07	2,52E+00	1,87E-01	1,11E-08	3,04E-05	1,29E-03	1,53E-04
Argamassa 50%	6,63E-07	2,44E+00	1,80E-01	1,06E-08	2,87E-05	1,25E-03	1,49E-04
Argamassa 60%	6,29E-07	2,32E+00	1,71E-01	1,01E-08	2,67E-05	1,19E-03	1,42E-04
Argamassa 70%	5,85E-07	2,16E+00	1,59E-01	9,35E-09	2,42E-05	1,11E-03	1,32E-04
Argamassa 80%	5,32E-07	1,97E+00	1,45E-01	8,47E-09	2,14E-05	1,01E-03	1,21E-04
Argamassa 90%	4,72E-07	1,75E+00	1,29E-01	7,51E-09	1,85E-05	8,97E-04	1,08E-04
Argamassa 100%	4,12E-07	1,53E+00	1,12E-01	6,52E-09	1,56E-05	7,83E-04	9,47E-05

Da mesma forma, na Tabela 4.2 são apresentados os resultados do impacte ambiental de cada uma das argamassas pelo método CED, tendo em consideração 1kg de argamassa.

Tabela 4.2 - Impacte ambiental das argamassas pelo método CED

Impacte ambiental das argamassas	Método	
	CED	
	UREP-NR	UREP-R
	MJ	MJ
Argamassas 0% (Referência)	3,34E+00	1,87E-01
Argamassa 10%	3,27E+00	1,85E-01
Argamassa 20%	3,26E+00	1,86E-01
Argamassa 30%	3,18E+00	1,84E-01
Argamassa 40%	3,13E+00	1,82E-01
Argamassa 50%	3,02E+00	1,78E-01
Argamassa 60%	2,88E+00	1,71E-01
Argamassa 70%	2,68E+00	1,61E-01
Argamassa 80%	2,44E+00	1,49E-01
Argamassa 90%	2,17E+00	1,34E-01
Argamassa 100%	1,89E+00	1,18E-01

#### 4.1. A Produção dos Constituintes das Argamassas

Na Tabela 4.3 são apresentados os resultados do impacte ambiental dos constituintes das argamassas pelo método CML, tendo em consideração 1kg de cada material.

Tabela 4.3 - Impacte ambiental para 1kg de cada material, pelo método CML

Impacte ambiental dos constituintes das argamassas	CML						
	DRA		AG	DOE	FOT	A	E
	kg Sb eq.	MJ	kg CO <sub>2</sub> eq.	kg CFC-11 eq.	kg etileno eq.	kg SO <sub>2</sub> eq.	kg PO <sub>4</sub> <sup>-3</sup> eq.
cimento	1,56E-06	5,79E-03	4,24E-01	2,47E-08	-5,91E-05	2,97E-03	3,57E-04
areia	2,75E-07	9,21E-01	7,50E-02	4,94E-09	-2,49E-05	4,61E-04	4,95E-05
resíduos de madeira	0,00E+00	0,00E+00	1,19E-03	0,00E+00	1,73E-08	6,41E-06	2,32E-06
água	3,67E-09	1,20E-02	1,38E-03	6,00E-11	-1,94E-07	6,21E-06	1,22E-06
Superplastificante	3,88E-11	-	0,771	8,78E-08	5,68E-05	4,26E-03	1,05E-03

Para comparar o impacte ambiental dos materiais das argamassas da presente dissertação e o impacte ambiental dos materiais de argamassas de outros estudos (Braga et al., 2017; Farinha et al., 2019), são apresentadas as tabelas 4.4 e 4.5.

Tabela 4.4 - Impacte ambiental para 1kg de cada material, pelo método CML (adaptado Farinha et al., 2019)

Impacte ambiental dos constituintes das argamassas	CML						
	DRA		AG	DOE	FOT	A	E
	kg Sb eq.	MJ	kg CO <sub>2</sub> eq.	kg CFC-11 eq.	kg etileno eq.	kg SO <sub>2</sub> eq.	kg PO <sub>4</sub> <sup>-3</sup> eq.
cimento	1,10E-06	2,84E-03	7,38E-01	1,10E-10	1,17E-04	1,21E-03	1,74E-04
areia	7,31E-11	2,88E-02	2,46E-03	3,83E-10	1,08E-06	1,90E-05	2,03E-06
introdutor de ar	3,66E-07	13,3	5,27E-01	7,56E-11	3,45E-04	1,30E-03	1,43E-04
superplastificante	1,10E-06	29,1	1,88	2,30E-10	3,12E-04	2,92E-03	1,03E-03
repelente de água	7,20E-05	57,0	2,67	4,26E-10	9,62E-04	8,29E-03	9,55E-04
resíduos de loiça sanitária	5,36E-10	8,88E-03	9,50E-04	3,29E-11	2,81E-07	7,31E-06	1,30E-06

Tabela 4.5 - Impacte ambiental para 1kg de cada material, pelo método CML (adaptado Braga et al., 2017)

Impactes ambientais dos constituintes das argamassas	Método						
	CML						
	DRA		AG	DOE	FOT	A	E
	kg Sb eq.	MJ	kg CO <sub>2</sub> eq.	kg CFC-11 eq.	kg etileno eq.	kg SO <sub>2</sub> eq.	kg PO <sub>4</sub> <sup>-3</sup> eq.
CEMII 32.5	0,0	-	0,73	7,95E-08	6,17E-05	2,08E-03	2,91E-04
Agregado fino de rio	3,37E-10	-	9,87E-03	1,71E-11	2,80E-06	4,58E-05	1,08E-05
Agregado fino britado	1,24E-09	-	2,79E-02	2,26E-10	9,06E-06	1,59E-04	3,54E-05
Agregado grosso de granito	1,09E-09	-	2,44E-02	2,43E-10	7,83E-06	1,44E-04	3,18E-05
Agregado grosso de calcário	1,39E-09	-	3,14E-02	2,09E-10	1,03E-05	1,75E-04	3,90E-05
CARC <sup>2</sup>	2,12E-10	-	7,44E-03	1,60E-10	2,14E-06	4,05E-05	9,28E-06
Água	1,57E-11	-	1,33E-04	5,93E-12	3,87E-08	9,70E-07	4,99E-08
Superplastificante	3,88E-11	-	0,771	8,78E-08	5,68E-05	4,26E-03	1,05E-03

Da mesma forma, na Tabela 4.6 são apresentados os resultados do impacte ambiental dos constituintes das argamassas pelo método CED, tendo em consideração 1kg de cada material.

Tabela 4.6 - Impacte ambiental para 1 kg de material, pelo método CED

Impactes ambientais dos constituintes das argamassas	CED	
	UREP – NR	UREP – R
	MJ	MJ
cimento	7,16	4,49E-01
areia	1,18	2,96E-02
resíduos de madeira	0,00	0,00
água	1,51E-02	3,54E-04
superplastificante	18	1,80E-05

<sup>2</sup> CARC – Agregado grosso reciclado proveniente do betão

Para uma comparação entre o impacto ambiental dos materiais das argamassas da presente dissertação e o impacto ambiental dos materiais de argamassas analisados em outros estudos (Braga et al., 2017; Farinha et al., 2019), são apresentadas as tabelas 4.7 e 4.8.

Tabela 4.7 - Impacte ambiental para 1 kg de material, pelo método CED (adaptado Farinha et al., 2019)

Impactes ambientais dos constituintes das argamassas	CED	
	UREP – NR	UREP – R
	MJ	MJ
cimento	3,04	1,80E-01
areia	4,23E-02	1,70E-03
introdutor de ar	14,2	8,24E-01
superplastificante	31,4	1,51
repelente de água	60,8	7,23
resíduos de loiça sanitária	1,09E-02	7,08E-03

Tabela 4.8 - Impacte ambiental para 1kg de cada material, pelo método CED (adaptado Braga et al., 2017)

Impactes ambientais dos constituintes das argamassas	CED	
	PE-NRe	PE-Re
	MJ	MJ
CEMII 32.5	4,59	0,242
agregado fino de rio	0,135	1,56E-04
agregado fino britado	0,392	4,52E-04
agregado grosso de granito	0,344	3,81E-04
agregado grosso de calcário	0,441	5,23E-04
CARC	0,108	9,61E-05
água	1,94E-03	0
superplastificante	18	1,80E-05

Como se pode observar os grandes contribuintes para o impacto ambiental nas argamassas estudadas sem qualquer dúvida são o cimento e a areia, sendo que nesta dissertação os valores das várias categorias de impacto tendem a ser maiores do que quando comparado com outros estudos. Neste caso, o uso de resíduos de madeira aplicados neste estudo tem um impacto bastante inferior em comparação com outros resíduos, por exemplo, resíduos de loiça sanitária ou resíduos CARC, tem uma enorme vantagem, pois em muitas das categorias selecionadas o seu impacto é nulo ou muito baixo.

No caso do aditivo superplastificante, por não se encontrar na base de dados do programa, para cálculo do seu efeito no impacto total das argamassas foram utilizados os valores estudados em Braga et al.,



2017. Como podemos também verificar, o aditivo superplastificante apresenta valores de impacte muito distintos entre os dois estudos já mencionados anteriormente e que estudaram este tipo de aditivo. Porém no caso estudado por Farinha et al., (2019), o impacte ambiental é muito grande, pois tem um valor bastante superior do impacte ambiental, nas várias categorias, quando comparado com outros aditivos, como por exemplo o aditivo introdutor de ar ou o repelente de água, sendo que no caso estudado por Braga et al., (2017) o valor de impacte ambiental nas diversas categorias é inferior ao impacte provocado pelo aditivo introdutor de ar no estudo já atrás mencionado. Apesar de ser o material que tem o maior impacte por 1 kg de material em comparação com todos os materiais, como a quantidade de material utilizada na constituição das argamassas estudadas é muito pequena, o superplastificante terá um impacte reduzido quando comparado com os outros materiais.

No caso da água, pode-se verificar que existe uma diferença entre os valores utilizados no presente estudo e os valores utilizados em Braga et al., (2017). Esta diferença poderá ter ocorrido devido à utilização de diferentes bases de dados, que poderão ter resultado em impactes ambientais diferentes.

#### 4.2. Transporte de Materiais

Este transporte é necessário para levar os materiais da sua origem de produção até ao local onde serão produzidas as argamassas pré-doseadas. Na Tabelas 4.9 são apresentados os resultados do impacte ambiental do transporte dos constituintes das argamassas por 1kg de material e por 1kg de distância, pelo método CML. Para uma comparação entre o impacte ambiental do transporte dos materiais das argamassas constituintes na presente dissertação e o impacte ambiental do transporte de materiais de argamassas de um outro estudo (Farinha et al., 2019), é apresentada a tabela 4.10.

Tabela 4.9 - Impacte ambiental de transporte para 1kg·m, pelo método CML

Impacte ambiental do transporte	CML						
	DRA		AG	DOE	FOT	A	E
	kg Sb eq.	MJ	kg CO <sub>2</sub> eq.	kg CFC-11 eq.	kg etileno eq.	kg SO <sub>2</sub> eq.	kg PO <sub>4</sub> <sup>-3</sup> eq.
	4,08E-11	8,26E-4	6,02E-5	7,80E-13	1,26E-8	2,87E-7	5,82E-8

Tabela 4.10 - Impacte ambiental de transporte para 1kg·m, pelo método CML (adaptado Farinha et al., 2019)

Impacte ambiental do transporte	CML						
	DRA		AG	DOE	FOT	A	E
	kg Sb eq.	MJ	kg CO <sub>2</sub> eq.	kg CFC-11 eq.	kg etileno eq.	kg SO <sub>2</sub> eq.	kg PO <sub>4</sub> <sup>-3</sup> eq.
	1,98E-12	6,99E-4	4,99E-5	1,01E-13	1,59E-8	2,2E-7	5,11E-8

Na tabela 4.11 são apresentados os resultados do impacte ambiental do transporte dos constituintes das argamassas por kg de material e por quilómetro de distância, pelo método CED. Para uma comparação, entre o impacte ambiental dos materiais das argamassas da presente dissertação e o impacte ambiental dos materiais de argamassas de um outro estudo, é apresentada a tabela 4.12.

Tabela 4.11 - Impacte ambiental de transporte para 1kg·m, pelo método CED

Impactes ambientais do transporte	CED	
	UREP – NR	UREP – R
	MJ	MJ
	9,15E-04	5,01E-06

Tabela 4.12 - Impacte ambiental de transporte para 1kg·m, pelo método CED (adaptado Farinha et al., 2019)

Impactes ambientais do transporte	CED	
	UREP – NR	UREP – R
	MJ	MJ
	7,03E-04	7,95E-07

Como se pode verificar, os valores do impacte ambiental, nas várias categorias seleccionadas, associados ao transporte considerado neste estudo são ligeiramente maiores, mas ainda assim muito próximos aos valores dos impactes obtidos noutro estudo similar (Farinha et al., 2019). Apenas na categoria de impacte do uso de recursos energéticos primários renováveis, o valor do impacte ambiental do transporte usado no presente estudo é inferior.

### 4.3. Categorias de Impacte Seleccionadas

#### 4.3.1. Depleção de Recursos Abióticos – Materiais

Na Tabela 4.13 são apresentados os resultados do impacte ambiental da componente de materiais da categoria de impacte de depleção de recursos abióticos, para todas as argamassas, discriminados pelos materiais utilizados.

Tabela 4.13 - Impacte ambiental da componente de materiais da categoria de impacte de depleção de recursos abióticos

Impacte ambiental de DRA – Materiais (kg Sb eq.)		Materiais				
		cimento	areia	resíduos de madeira	água	SP
Argamassas	0% (Referência)	5,98E-07	1,37E-07	0,00E+00	4,23E-10	4,47E-14
	10%	5,95E-07	1,23E-07	0,00E+00	5,61E-10	5,18E-14
	20%	6,03E-07	1,11E-07	0,00E+00	6,40E-10	6,01E-14
	30%	6,00E-07	9,65E-08	0,00E+00	7,78E-10	7,47E-14
	40%	6,01E-07	8,29E-08	0,00E+00	8,93E-10	8,23E-14
	50%	5,92E-07	6,80E-08	0,00E+00	1,06E-09	9,47E-14
	60%	5,74E-07	5,27E-08	0,00E+00	1,25E-09	1,05E-13
	70%	5,44E-07	3,75E-08	0,00E+00	1,49E-09	1,13E-13
	80%	5,05E-07	2,32E-08	0,00E+00	1,74E-09	1,19E-13
	90%	4,58E-07	1,05E-08	0,00E+00	2,02E-09	1,22E-13
100%	4,08E-07	0,00E+00	0,00E+00	2,28E-09	1,22E-13	

O cimento e a areia foram os materiais com maior impacte nesta componente da categoria de impacte de DRA. O ligante foi o principal responsável pelo impacte desta categoria, variando a sua contribuição entre 81%, na argamassa de referência e 99% na argamassa 100%. A contribuição da areia varia entre os 19%, na argamassa de referência, e 0%, na argamassa 100%, (quando a areia é totalmente substituída). O valor da água é sempre praticamente nulo, sendo que na argamassa 100% a sua contribuição atinge aproximadamente 1%. Nesta categoria, todas as argamassas tiveram sempre um impacte inferior ao da argamassa de referência.

O resultado do indicador DRA – Materiais está associado ao elevado consumo de minerais. Os resultados estão coerentes, pois o processo de produção de cimento é o que consome mais minerais. Para além dos minerais recolhidos na fase de extração dos minerais, também são consumidas outras matérias primas secundárias, que são transportadas para as instalações da fábrica.

#### 4.3.2. Depleção de Recursos Abióticos - Fósseis

Na Tabela 4.14 são apresentados resultados do impacte ambiental da componente de combustíveis fósseis da categoria de impacte de depleção de recursos abióticos, para todas as argamassas, discriminados pelos materiais utilizados.

Tabela 4.14 - Impacte ambiental da componente de combustíveis fósseis da categoria de impacte de depleção de recursos abióticos

Impacte ambiental de DRA – Fósseis (MJ)		Materiais				
		cimento	areia	resíduos de madeira	água	SP
Argamassas	0% (Referência)	2,22E00	4,61E-01	0,00E+00	1,38E-03	-
	10%	2,21E00	4,12E-01	0,00E+00	1,83E-03	-
	20%	2,24E00	3,72E-01	0,00E+00	2,08E-03	-
	30%	2,23E00	3,23E-01	0,00E+00	2,53E-03	-
	40%	2,23E00	2,78E-01	0,00E+00	2,91E-03	-
	50%	2,20E00	2,28E-01	0,00E+00	3,43E-03	-
	60%	2,13E00	1,77E-01	0,00E+00	4,08E-03	-
	70%	2,02E00	1,26E-01	0,00E+00	4,83E-03	-
	80%	1,88E00	7,78E-02	0,00E+00	5,68E-03	-
	90%	1,70E00	3,53E-02	0,00E+00	6,56E-03	-
	100%	1,52E00	0,00E+00	0,00E+00	7,42E-03	-

Na categoria de impacte ambiental de DRA – Fósseis, os materiais que mais contribuíram foram o cimento e a areia. O ligante foi mais uma vez o principal responsável pelo impacte desta categoria, variando a sua contribuição varia entre 83 e 100% na argamassa de referência e na argamassa de 100%, respetivamente. A contribuição da areia varia entre 17 e 0%. A contribuição da água é sempre praticamente nula. Nesta categoria, todas as argamassas tiveram um impacte inferior ao da argamassa de referência.

O resultado do indicador DRA – Fósseis está associado ao transporte. Os resultados estão coerentes, porque o processo de produção de cimento requer mais quantidade de materiais do que no processo de produção de areia, logo vai precisar também de mais transporte e por isso terá um impacte ambiental maior.

### 4.3.3. Aquecimento Global

A emissão de dióxido de carbono é a mais importante emissão atmosférica no que diz respeito à produção das argamassas. O dióxido de carbono é um gás com efeito de estufa que tem como principal consequência o aumento do aquecimento global e as alterações climáticas. Na Tabela 4.15 são apresentados os resultados do impacte ambiental na categoria de impacte de aquecimento global, para todas as argamassas, discriminados pelos materiais utilizados.

Tabela 4.15 - Impacte ambiental da categoria de impacte de aquecimento global

Impacte ambiental de AG (kg CO <sub>2</sub> eq.)		Materiais				
		cimento	areia	resíduos de madeira	água	SP
Argamassas	0% (Referência)	1,63E-01	3,75E-02	0,00E+00	1,59E-04	8,88E-04
	10%	1,62E-01	3,36E-02	1,99E-05	2,10E-04	1,03E-03
	20%	1,64E-01	3,03E-02	4,03E-05	2,40E-04	1,19E-03
	30%	1,63E-01	2,63E-02	6,01E-05	2,92E-04	1,48E-03
	40%	1,63E-01	2,26E-02	8,03E-05	3,35E-04	1,64E-03
	50%	1,61E-01	1,86E-02	9,88E-05	3,96E-04	1,88E-03
	60%	1,56E-01	1,44E-02	1,15E-04	4,69E-04	2,09E-03
	70%	1,48E-01	1,02E-02	1,27E-04	5,57E-04	2,26E-03
	80%	1,37E-01	6,34E-03	1,35E-04	6,54E-04	2,37E-03
	90%	1,25E-01	2,87E-03	1,38E-04	7,56E-04	2,43E-03
100%	1,11E-01	0,00E+00	1,36E-04	8,55E-04	2,42E-03	

Nas argamassas analisadas, o cimento foi o material que mais contribuiu para a categoria de impacte do aquecimento global, aumentando assim o efeito de estufa. A contribuição do cimento varia entre 81%, na argamassa de referência e 99% na argamassa 100%. A contribuição da areia varia entre 19%, na argamassa de referência e 0% na argamassa 100%. Todas as argamassas analisadas tiveram um impacte inferior ao da argamassa de referência.

No que diz respeito à contribuição da produção de cimento, esta está associada principalmente à queima de combustíveis fósseis na fase de produção de clínquer, que liberta bastante CO<sub>2</sub> para a atmosfera. Existe ainda uma quantidade elevada de emissão atmosférica de CO<sub>2</sub> como consequência da descarbonização do calcário, na fase de cozedura do cru. No caso da produção de areia, a sua contribuição está associada à extração e ao transporte interno.

#### 4.3.4. Depleção do Ozono Estratosférico

Na Tabela 4.16 são apresentados resultados do impacte ambiental da categoria de impacte de depleção do ozono estratosférico, para todas as argamassas, discriminados pelos materiais utilizados.

Tabela 4.16 - Impacte ambiental da categoria de impacte de depleção do ozono estratosférico

Impacte ambiental de DOE (kg CFC-11 eq.)		Materiais				
		cimento	areia	resíduos de madeira	água	SP
Argamassas	0% (Referência)	9,48E-09	2,47E-09	0,00E+00	6,90E-12	1,01E-10
	10%	9,43E-09	2,21E-09	0,00E+00	9,16E-12	1,17E-10
	20%	9,56E-09	1,99E-09	0,00E+00	1,04E-11	1,36E-10
	30%	9,50E-09	1,73E-09	0,00E+00	1,27E-11	1,69E-10
	40%	9,52E-09	1,49E-09	0,00E+00	1,46E-11	1,86E-10
	50%	9,38E-09	1,22E-09	0,00E+00	1,72E-11	2,14E-10
	60%	9,09E-09	9,48E-10	0,00E+00	2,04E-11	2,38E-10
	70%	8,62E-09	6,75E-10	0,00E+00	2,42E-11	2,57E-10
	80%	8,00E-09	4,17E-10	0,00E+00	2,85E-11	2,70E-10
	90%	7,26E-09	1,89E-10	0,00E+00	3,29E-11	2,76E-10
	100%	6,46E-09	0,00E+00	0,00E+00	3,72E-11	2,76E-10

O cimento e a areia foram os materiais com maior impacte nesta componente da categoria de impacte de DOE. O ligante foi o principal responsável pelo impacte desta categoria, onde a sua contribuição varia entre 79%, na argamassa de referência, e 99%, na argamassa 100%. A contribuição da areia varia entre 21% na argamassa de referência e 0%, na argamassa 100% (quando o agregado é apenas constituído pelos resíduos de madeira). O valor da água é sempre praticamente nulo, sendo que na argamassa 100% a sua contribuição atinge aproximadamente 1%.

O resultado deste indicador ambiental está associado principalmente à produção de energia primária. Os resultados apresentam-se coerentes, pois é a produção de cimento que exige um maior consumo de energia elétrica e combustíveis fósseis, enquanto que na produção de areia, a sua contribuição para esta categoria é devida aos combustíveis fósseis associados ao transporte interno. As CFCs são as emissões que mais contribuem para este impacte. No geral, todas as argamassas diminuíram o resultado total do impacte ambiental em comparação com a argamassa de referência.

#### 4.3.5. Formação do Ozono Troposférico

Na Tabela 4.17 são apresentados resultados do impacte ambiental da categoria de impacte de formação de ozono troposférico, para todas as argamassas, discriminados pelos materiais utilizados.

Tabela 4.17 - Impacte ambiental da categoria de impacte de formação de ozono troposférico

Impacte ambiental de FOT (kg etileno eq.)		Materiais				
		cimento	areia	resíduos de madeira	água	SP
Argamassas	0% (Referência)	2,27E-05	1,25E-05	0,00E+00	2,24E-08	6,54E-08
	10%	2,26E-05	1,11E-05	2,89E-10	2,97E-08	7,59E-08
	20%	2,29E-05	1,00E-05	5,86E-10	3,39E-08	8,79E-08
	30%	2,28E-05	8,74E-06	8,74E-10	4,11E-08	1,09E-07
	40%	2,28E-05	7,51E-06	1,17E-09	4,72E-08	1,21E-07
	50%	2,25E-05	6,16E-06	1,44E-09	5,58E-08	1,39E-07
	60%	2,18E-05	4,78E-06	1,67E-09	6,62E-08	1,54E-07
	70%	2,06E-05	3,40E-06	1,85E-09	7,86E-08	1,66E-07
	80%	1,92E-05	2,10E-06	1,96E-09	9,23E-08	1,75E-07
	90%	1,74E-05	9,54E-07	2,00E-09	1,07E-07	1,79E-07
100%	1,55E-05	0,00E+00	1,98E-09	1,21E-07	1,79E-07	

Nas argamassas analisadas, o cimento foi o principal responsável pelo impacte desta categoria, variando a sua contribuição entre 65%, na argamassa de referência e 99% na argamassa 100%. A areia também teve uma contribuição considerável, variando entre 35 e 0%, nas mesmas argamassas que o cimento, respetivamente. A contribuição dos resíduos de madeira e da água são praticamente nulos, quando comparados com as do ligante e da areia. Nesta categoria, todas as argamassas tiveram sempre um impacte inferior ao da argamassa de referência.

O resultado deste indicador ambiental está associado ao fenómeno de oxidação fotoquímica, onde a contribuição do cimento foi a maior de todas como era esperado. As emissões atmosféricas que mais contribuem para este impacte são as de CO, SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, e, embora com uma contribuição menor, COVNM<sup>3</sup>. Estas emissões são consequência da utilização de combustíveis do processo de produção dos materiais e do transporte. Os combustíveis alternativos apesar de também contribuírem para este impacte ambiental, quando usados em substituição, em parte ou completamente, de outro tipo de combustível, podem ter benefícios bastante significativos, pois podem baixar muito o valor do impacte desta categoria.

#### 4.3.6. Acidificação

Na Tabela 4.18 são apresentados resultados do impacte ambiental da categoria de impacte de acidificação, para todas as argamassas, discriminados pelos materiais utilizados.

<sup>3</sup> COVNM – Compostos orgânicos voláteis não metânicos

Tabela 4.18 - Impacte ambiental da categoria de impacte de acidificação

Impacte ambiental de A (kg SO <sub>2</sub> eq.)		Materiais				
		cimento	areia	resíduos de madeira	água	SP
Argamassas	0% (Referência)	1,14E-03	2,31E-04	0,00E+00	7,15E-07	4,90E-06
	10%	1,13E-03	2,06E-04	1,07E-07	9,48E-07	5,69E-06
	20%	1,15E-03	1,86E-04	2,18E-07	1,08E-06	6,60E-06
	30%	1,14E-03	1,62E-04	3,25E-07	1,31E-06	8,20E-06
	40%	1,14E-03	1,39E-04	4,34E-07	1,51E-06	9,04E-06
	50%	1,13E-03	1,14E-04	5,34E-07	1,78E-06	1,04E-05
	60%	1,09E-03	8,84E-05	6,21E-07	2,12E-06	1,15E-05
	70%	1,04E-03	6,29E-05	6,87E-07	2,51E-06	1,25E-05
	80%	9,61E-04	3,89E-05	7,29E-07	2,95E-06	1,31E-05
	90%	8,72E-04	1,77E-05	7,44E-07	3,41E-06	1,34E-05
	100%	7,76E-04	0,00E+00	7,36E-07	3,85E-06	1,34E-05

Na categoria de impacte ambiental de acidificação, o material que mais contribuiu foi o cimento. O ligante foi mais uma vez o principal responsável pelo impacte desta categoria, variando a sua contribuição entre 83 e 99%, na argamassa de referência e de 100%, respetivamente. A areia também teve uma contribuição considerável para este impacte, com valores variando entre 17 e 0%. As contribuições dos resíduos de madeira e da água são bastante inferiores quando comparados com o cimento e a areia. No geral, todas as argamassas diminuíram o resultado total do impacte ambiental em comparação com a argamassa de referência.

O resultado do indicador ambiental de acidificação está associado à queima dos combustíveis fósseis e dos alternativos, e do transporte das matérias-primas. Os poluentes que mais contribuíram nas emissões para o meio ambiente foram o NO<sub>x</sub> e o SO<sub>2</sub>. A substituição de combustíveis correntes pelos combustíveis alternativos é muito importante, pela diminuição do impacte negativo no ambiente e pelo ganho na sustentabilidade, devido ao decréscimo de compostos de azoto e de enxofre.

#### 4.3.7. Eutrofização

Na Tabela 4.19 são apresentados os resultados do impacte ambiental da categoria de impacte de eutrofização, para todas as argamassas, discriminados pelos materiais utilizados.



Tabela 4.19 - Impacte ambiental da categoria de impacte de eutrofização

Impacte ambiental de E (kg PO <sub>4</sub> <sup>-3</sup> eq.)		Materiais				
		cimento	areia	resíduos de madeira	água	SP
Argamassas	0% (Referência)	1,37E-04	2,48E-05	0,00E+00	1,41E-07	1,21E-06
	10%	1,36E-04	2,22E-05	3,88E-08	1,86E-07	1,40E-06
	20%	1,38E-04	2,00E-05	7,87E-08	2,13E-07	1,63E-06
	30%	1,37E-04	1,74E-05	1,17E-07	2,58E-07	2,02E-06
	40%	1,38E-04	1,49E-05	1,57E-07	2,97E-07	2,23E-06
	50%	1,35E-04	1,22E-05	1,93E-07	3,51E-07	2,56E-06
	60%	1,31E-04	9,49E-06	2,25E-07	4,16E-07	2,84E-06
	70%	1,25E-04	6,76E-06	2,49E-07	4,93E-07	3,07E-06
	80%	1,16E-04	4,18E-06	2,64E-07	5,80E-07	3,23E-06
	90%	1,05E-04	1,90E-06	2,69E-07	6,69E-07	3,30E-06
	100%	9,33E-05	0,00E+00	2,66E-07	7,57E-07	3,30E-06

O cimento e a areia foram os materiais com maior impacte na categoria de impacte de eutrofização. O cimento foi o responsável por 85% da contribuição da argamassa de referência para o impacte total e a areia por 15%. Na argamassa 100%, a areia deixa de ter contribuição, ficando o cimento responsável por 99% e a água por 1%. Apesar de os resíduos de madeira e da água terem algum valor neste impacte, esse valor é praticamente nulo, não tendo expressão em comparação com os do cimento ou da areia.

O resultado deste indicador ambiental está associado principalmente ao processo de produção de areia e cimento. Os compostos de azoto, com principal destaque para NO e NO<sub>2</sub>, são os poluentes que mais contribuem para este impacte. As emissões decorrem como consequência do maior consumo de materiais e energia. No geral todas as argamassas diminuíram o resultado total do impacte ambiental em comparação com a argamassa de referência.

#### 4.3.8. Uso de Recursos de Energia Primários Não Renovável

Na Tabela 4.20 são apresentados resultados do impacte ambiental da componente não renovável da categoria de impacte do uso de recursos de energia primária, para todas as argamassas, discriminados pelos materiais utilizados.

Tabela 4.20 - Impacte ambiental da categoria de impacte do uso de recursos de energia primários não renováveis

Impacte ambiental de UREP – NR (MJ)		Materiais				
		cimento	areia	resíduos de madeira	água	SP
Argamassas	0% (Referência)	2,75E+00	5,89E-01	0,00E+00	1,74E-03	2,07E-02
	10%	2,73E+00	5,27E-01	0,00E+00	2,31E-03	2,40E-02
	20%	2,77E+00	4,75E-01	0,00E+00	2,64E-03	2,79E-02
	30%	2,76E+00	4,13E-01	0,00E+00	3,20E-03	3,46E-02
	40%	2,76E+00	3,55E-01	0,00E+00	3,68E-03	3,82E-02
	50%	2,72E+00	2,91E-01	0,00E+00	4,35E-03	4,39E-02
	60%	2,64E+00	2,26E-01	0,00E+00	5,16E-03	4,87E-02
	70%	2,50E+00	1,61E-01	0,00E+00	6,12E-03	5,27E-02
	80%	2,32E+00	9,94E-02	0,00E+00	7,19E-03	5,53E-02
	90%	2,11E+00	4,51E-02	0,00E+00	8,30E-03	5,66E-02
	100%	1,88E+00	0,00E+00	0,00E+00	9,39E-03	5,66E-02

O cimento foi o material com maior impacte na categoria de utilização de recursos de energia primária não renováveis. O cimento foi o principal responsável com a sua contribuição para o impacte ambiental desta categoria variando entre 82% na argamassa de referência e 99% na argamassa 100%. A areia tem uma contribuição de 18 %, na argamassa de referência, mas deixa de ter contribuição na argamassa 100%. Apesar da água ter algum valor neste impacte, esse valor é praticamente nulo, não tendo expressão em comparação com os do cimento ou da areia.

O resultado do indicador ambiental relativo à utilização de recursos de energia primária não renováveis está associado ao consumo de energia primária e combustíveis fósseis, proveniente de recursos não renováveis, onde a contribuição do cimento foi a maior de todas, como era esperado. Os recursos fósseis são os que mais contribuem para esta categoria de impacte. Quanto mais energia for precisa para produção dos constituintes da argamassa, maior vai ser o impacte nesta categoria.

#### 4.3.9. Uso de Recursos de Energia Primária Renovável

Na Tabela 4.21 são apresentados resultados do impacte ambiental da componente renovável da categoria de impacte de uso de recurso de energia primária, para todas as argamassas, discriminados pelos materiais utilizados.

Tabela 4.21 - Impacte ambiental da categoria de impacte do uso de recursos de energia primários renováveis

Impacte ambiental de UREP – R (MJ)		Materiais				
		cimento	areia	resíduos de madeira	água	SP
Argamassas	0% (Referência)	1,72E-01	1,48E-02	0,00E+00	4,08E-05	2,07E-08
	10%	1,71E-01	1,33E-02	0,00E+00	5,41E-05	2,40E-08
	20%	1,74E-01	1,19E-02	0,00E+00	6,17E-05	2,79E-08
	30%	1,73E-01	1,04E-02	0,00E+00	7,50E-05	3,46E-08
	40%	1,73E-01	8,93E-03	0,00E+00	8,61E-05	3,82E-08
	50%	1,70E-01	7,33E-03	0,00E+00	1,02E-04	4,39E-08
	60%	1,65E-01	5,68E-03	0,00E+00	1,21E-04	4,87E-08
	70%	1,57E-01	4,04E-03	0,00E+00	1,43E-04	5,27E-08
	80%	1,45E-01	2,50E-03	0,00E+00	1,68E-04	5,53E-08
	90%	1,32E-01	1,13E-03	0,00E+00	1,94E-04	5,66E-08
	100%	1,17E-01	0,00E+00	0,00E+00	2,20E-04	5,66E-08

O material que teve maior impacte na categoria de impacte, da utilização de recursos de energia primária renováveis, foi o cimento. O cimento foi responsável por 92% e a areia por 8% da contribuição da argamassa de referência para o impacte total. Na argamassa 100%, a areia deixa de ter contribuição, ficando o cimento como o principal e único responsável. O valor da água neste impacte é praticamente nulo quando comparado com os do cimento e da areia.

O resultado do indicador ambiental, utilização de recursos de energia primária renováveis, está associado ao consumo de energia primária, proveniente de recursos renováveis, onde a contribuição do cimento foi a maior de todas, como também era esperado.

De uma forma geral, o maior impacte ambiental das argamassas é proveniente do cimento e da areia, como já seria de esperar pela simples observação da tabela 3.6 do capítulo anterior e das tabelas 4.3 e 4.5 deste capítulo. Estes valores que estão em concordância com valores de outros estudos (Braga et al., 2017; Farinha et al., 2019) como se pode verificar pelas tabelas 4.4 e 4.6, apesar de neste estudo os valores do impacte devido ao cimento e à areia serem mais elevados.

#### 4.4. Melhorias

Na tabela 4.22 e na tabela 4.23, apresentam-se as melhorias totais de todas as argamassas, em que se substituiu o agregado areia por resíduos de madeira, em comparação com a argamassa de

referência sem qualquer resíduo de madeira, em todas as categorias de impacto selecionadas nos métodos CML e CED, respectivamente.

Tabela 4.22 - Melhorias em percentagem das argamassas melhoradas em comparação com a argamassa de referência, pelo método CML

Melhorias nos impactos ambientais das argamassas	Métodos						
	Linha de Base Método CML						
	DRA		AG	DOE	FOT	A	E
	kg Sb eq.	MJ	kg CO <sub>2</sub> eq.	kg CFC-11 eq.	kg etileno eq.	kg SO <sub>2</sub> eq.	kg PO <sub>4</sub> <sup>-3</sup> eq.
Argamassa Ref. (0%)	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Argamassa 10%	2%	10%	2%	3%	4%	2%	2%
Argamassa 20%	3%	19%	3%	3%	6%	2%	2%
Argamassa 30%	5%	29%	5%	6%	10%	5%	4%
Argamassa 40%	7%	39%	7%	8%	14%	6%	5%
Argamassa 50%	10%	50%	10%	11%	18%	9%	8%
Argamassa 60%	15%	61%	15%	16%	24%	14%	12%
Argamassa 70%	21%	71%	21%	22%	31%	19%	18%
Argamassa 80%	28%	82%	28%	29%	39%	27%	25%
Argamassa 90%	36%	91%	36%	37%	47%	35%	33%
Argamassa 100%	44%	98%	44%	46%	56%	43%	42%

Tabela 4.23 - Melhorias em percentagem das argamassas melhoradas em comparação com a argamassa de referência, pelo método CED

Impactes ambientais das argamassas	Métodos	
	Energia cumulativa	
	UREP – NR	UREP – R
	MJ	MJ
Argamassa Ref. (0%)	0%	0%
Argamassa 10%	2%	1%
Argamassa 20%	3%	1%
Argamassa 30%	5%	2%
Argamassa 40%	6%	3%
Argamassa 50%	10%	5%
Argamassa 60%	14%	8%
Argamassa 70%	20%	14%
Argamassa 80%	27%	21%
Argamassa 90%	35%	29%
Argamassa 100%	43%	37%

Pode-se observar que a primeira argamassa não apresenta qualquer melhoria, porque essa argamassa é a própria argamassa de referência. Na argamassa onde existem apenas resíduos de madeira e não areia (Argamassa 100%), as melhorias são entre 37% e os 52%, sendo que na componente fósseis da

categoria de impacto ambiental de depleção dos recursos abióticos, pelo método CML, as melhorias atingem o valor de 98%.

Nas tabelas 4.24 e 4.25 apresentam-se as melhorias totais das argamassas, em que se substituiu apenas o agregado areia por outro tipo de resíduos de madeira, em comparação com a argamassa de referência, valores que são provenientes de um estudo feito por Farinha et al. (2019).

Tabela 4.24 - Melhorias em percentagem das argamassas melhoradas em comparação com a argamassa de referência, pelo método CML (adaptado Farinha et al., 2019)

Melhoria nos impactos ambientais das argamassas	Percentagem de volume de areia substituída (%)	CML						
		DRA		AG	DOE	FOT	A	E
		kg Sb-eq.	MJ	kg CO <sub>2</sub> eq.	kg CFC-11 eq.	kg etileno eq.	kg SO <sub>2</sub> eq.	kg PO <sub>4</sub> <sup>-3</sup> eq.
REF <sup>4</sup>	0	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
GFRP <sup>5</sup>	50	0%	27%	4%	39%	7%	10%	12%
SW <sup>6</sup>	100	0%	2%	0%	59%	2%	3%	0%
SWF	20	0%	3%	0%	13%	1%	2%	1%
SW+GFRP	100	0%	28%	4%	68%	8%	12%	12%

Tabela 4.25 - Melhorias em percentagem das argamassas melhoradas em comparação com a argamassa de referência, pelo método CED (adaptado Farinha et al., 2019)

Impactes ambientais das argamassas	Percentagem de volume de areia substituída (%)	CED	
		UREP – NR	UREP – R
		MJ	MJ
REF	0	0%	0%
GFRP	50	11%	6%
SW	100	3%	-5%
SWF <sup>7</sup>	20	2%	0%
SW+GFRP	100	13%	3%

Estas duas últimas tabelas apenas são possíveis de serem analisadas, quando comparadas com as duas tabelas de melhorias das argamassas de resíduos de madeira do presente estudo, nas mesmas percentagens de agregado de areia substituído. Pode-se observar que as argamassas com resíduos de madeira têm melhorias mais altas nas categorias DRA (materiais e fósseis), AG e FOT, de 10%, 50%, 10% e 18%, respetivamente, em comparação com as argamassas GFRP, sendo que estas têm valores superiores nas restantes categorias. Em comparação com as argamassas SW e SW+GFRP, as argamassas com resíduos de madeira apresentam sempre muito melhores resultados, sendo que apenas a categoria DOE apresenta o resultado mais baixo, de 46%, enquanto que nas argamassas

<sup>4</sup> REF - Argamassa de Referência

<sup>5</sup> GFRP – Argamassa com polímeros reforçados com fibra de vidro

<sup>6</sup> SW – Argamassa com resíduo de loiças sanitárias (agregado)

<sup>7</sup> SWF – Argamassa com resíduo de loiças sanitárias (filler)

SW e SW+GFRO a melhoria é de 59% e 68%, respectivamente. Em comparação com a argamassa SWF, a argamassa com resíduos de madeira (na mesma percentagem de substituição de agregado) apresenta sempre melhores resultados, sendo que apenas na categoria DOE apresenta o resultado mais baixo, de 3%, enquanto que na argamassa SWF a melhoria é de 13%.

## 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

### 5.1. Conclusões

A presente dissertação teve como objetivo avaliar o desempenho ambiental de argamassas com resíduos de madeira e comparar os resultados obtidos com outros estudos, tendo em conta também o desempenho técnico estudado em outras dissertações.

Neste estudo, dez argamassas com incorporação de resíduos de madeira foram analisadas em paralelo com uma argamassa de referência. Com o objetivo de determinar as melhorias ambientais dessas argamassas foram analisadas oito categorias de impacto ambiental, utilizando dois métodos diferentes. As categorias selecionadas foram a depleção de recursos abióticos, tanto a componente de materiais como a de fósseis, o aquecimento global, a depleção do ozono estratosférico, a formação do ozono troposférico, a acidificação, a eutrofização, do método CML *baseline* e o uso de recursos de energia primária não renováveis e renováveis, através do método *Cumulative Energy Demand* (CED).

Os impactos ambientais das argamassas com resíduos de madeira foram principalmente devidos ao processo de extração e de transporte interno, no caso da areia, enquanto que no caso do cimento, foram principalmente devidos ao processo de produção de cimento. No caso dos resíduos, o impacto é apenas devido à energia elétrica consumida no processamento e no transporte interno. Portanto, as argamassas com uma percentagem maior de resíduos de madeira apresentam um melhor comportamento ambiental do que o da argamassa de referência.

A avaliação do impacto ambiental do ciclo de vida das argamassas com resíduos de madeira, tendo apenas em conta a sua produção, foi determinante para quantificar a possível sustentabilidade ambiental dos rebocos em análise. O primeiro grande objetivo era comparar os impactos ambientais das argamassas modificadas com os da argamassa de referência. Havia algumas suposições na ACV que foram enumeradas no subcapítulo 3.2.4. No entanto como todas essas suposições adotadas são igualmente colocadas para todas as argamassas analisadas, não tiveram efeito algum no resultado final. A redução dos impactos ambientais das argamassas com resíduos é clara para todas as argamassas alteradas, sendo essa diferença cada vez maior com o aumento da percentagem dos resíduos de madeira em substituição pela areia.

Assim, com base apenas nas tabelas 4.22 e 4.23, que mostram as melhorias das argamassas em que se substituiu o agregado areia por resíduos de madeira, com uma variação constante de 10 %, em comparação com a argamassa de referência que contém apenas como agregado a areia, pode-se concluir que a argamassa 100% é a melhor no que diz respeito aos impactos ambientais, pois apresenta os valores mais altos em termos de melhorias. Também com base nas tabelas 4.24 e 4.25, as argamassas com resíduos de madeira, na maioria das categorias analisadas, têm um melhor desempenho ambiental quando comparadas com argamassas com outros resíduos na mesma

percentagem de substituição de agregado. O outro grande objetivo era comparar os resultados da ACV com o comportamento técnico analisado num âmbito dum estudo anterior (Martinho, 2017), porque pode-se aumentar a percentagem de resíduos de madeira para baixar os impactes ambientais, mas poderá estar-se a piorar as características físicas e mecânicas das argamassas, ou até mesmo comprometer o próprio processo de amassadura, tornando-as impossíveis de serem aplicadas.

Com este cruzamento de análises, pode-se concluir que uma substituição de cerca de 40% de areia por resíduos de madeira, conduz a uma melhoria entre os 3 % e 14 %, consoante a categoria de impacte a analisar, podendo mesmo resultar numa melhoria de 39 % no caso da componente dos fósseis da categoria de depleção dos recursos abióticos. Estes valores são benéficos para o impacte que essa argamassa vai ter no ambiente, e por isso uma boa razão para que no futuro se explore mais estas argamassas com resíduos, para que se possam tornar cada vez mais correntes. Por outro lado, o desempenho técnico destas argamassas diminui de acordo com o estudo anteriormente mencionado (Martinho, 2017), como por exemplo em termos de resistência à compressão. No entanto, os valores alcançados são suficientes para cumprir os requisitos mínimos exigidos na norma portuguesa NP EN 998-1:2017 para argamassas de reboco. Para uma argamassa com resíduos de madeira substituindo 40% da areia, a classe de resistência à compressão correspondente é a categoria CS IV especificada pela norma NP EN 998-1:2017, sendo que o valor mínimo de resistência da classe mais baixa (CS I) é de 0,4MPa.

## **5.2. Desenvolvimentos Futuros**

A sustentabilidade é um assunto bastante importante nos dias de hoje face à ocorrência de catástrofes naturais provocadas pela má gestão dos recursos, principalmente os recursos não renováveis. Por isso, as indústrias da produção de cimento e de areia têm um papel fundamental, não só na economia do país mas também na sustentabilidade.

A realização de uma ACV de qualquer produto depende não só da metodologia que se adota, mas também da informação disponível sobre esse produto. Na presente dissertação aplica-se uma análise desde a extração das matérias-primas até à criação da argamassa, com recurso à literatura consultada e tendo em conta as etapas em que havia dados disponíveis. No entanto, os limites da análise efetuada podem ainda ser alargados, para permitir avaliar os impactes ambientais dos produtos mencionados desde a extração da matéria-prima até ao seu fim de vida, englobando os processos de aplicação. No entanto, é preciso ter em conta outros aspetos ao fazer esta avaliação como aspetos económicos, políticos e sociais. Estes aspetos são necessários para se fazer uma tomada de decisão mais consciente. Um desenvolvimento futuro pode passar pela análise da viabilidade económica das argamassas com resíduos face às argamassas tradicionais. Outro desenvolvimento que pode ser trabalhado futuramente, é desenvolver uma metodologia de ACV, idêntica à presente dissertação, para argamassas com diferentes resíduos provenientes de outras indústrias, como por exemplo resíduos de plástico, resíduos de vidro e resíduos da construção e demolição (RCD).



## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ahmed, A., & Sturges, J. (2015). *Materials Science In Construction: An Introduction*. Routledge.
- Almeida, J. (2010). *Argamassas tradicionais e industriais de alvenaria em edifícios, Dissertação em Mestrado de Engenharia Civil*. Dissertação em Mestrado de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- Barros, C. S. A. (2013). *Produção de Pellets para valorização de resíduos provenientes da indústria corticeira*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica, Universidade do Minho. Retrieved from [https://repositorium.sdum.uminho.pt/bitstream/1822/28198/1/tese\\_Carla Barros\\_2013.pdf](https://repositorium.sdum.uminho.pt/bitstream/1822/28198/1/tese_Carla%20Barros_2013.pdf)
- Bionova. (2019). Software. Retrieved from <https://www.oneclicklca.com/support/faq/>
- Braga, A. M., Silvestre, J. D., & de Brito, J. (2017). Compared environmental and economic impact from cradle to gate of concrete with natural and recycled coarse aggregates. *Journal of Cleaner Production*, 162, 529–543. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.06.057>
- Carvalho, N. (2011). *Implementação do Plano de Controlo, Inspeção e Ensaio na Produção de Pellets de Madeira, Dissertação em Mestrado em Tecnologias Ambientais*. Tese em Mestrado em Tecnologias Ambientais, Universidade de Aveiro.
- CE, (2008). Guidance on the interpretation of key provisions of Directive 2008/98/EC on waste.
- CE, (2015). Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions: Closing the loop - An EU action plan for the Circular Economy EN.
- CE, (2018). Legislation. *Official Journal of the European Union*, 61.
- CEN. (2014). EN ISO 17225-2:2014. *Solid Biofuels — Fuel Specifications and Classes Part 2 : Graded Wood Pellets*.
- Cimpor. (2019). Diagrama do processo de fabrico de cimento, 1.
- Coutinho, A. de S. (2006). *Fabrico e propriedades do betão*. (LNEC, Ed.).
- Curran, M. A. (1996). *Environmental Life-Cycle Assessment*. (McGraw-Hill, Ed.).
- DGEG, (2016). Guião De Pedreiras. Retrieved from [www.dgeg.gov.pt/wwwbase/wwwinclude/ficheiro.aspx?tipo=1&id=39875%0A](http://www.dgeg.gov.pt/wwwbase/wwwinclude/ficheiro.aspx?tipo=1&id=39875%0A)
- DGEG, (2019). Sistema de Gestão Consumos Intensivos de Energia - SGCIE. Retrieved from <http://www.dgeg.gov.pt/default.aspx?cn=6363644888348835AAAAAAAA>

- Eubia, (2009). Logistic Management of Wood Pellets; Data Collection on Transportation, Storage & Delivery Management. *Development and Promotion of a Transparent European Pellets Market Creation of a European Real-Time Pellets Atlas*.
- Faria, P. (2012). Argamassas Sustentáveis. *2ª Conferência Construção e Reabilitação Sustentável de Edifícios No Espaço Lusófono*, 1–12.
- Farinha, C., Silvestre, J., & Brito, J. De. (2019). Life Cycle Assessment of Mortars with Incorporation of Industrial Wastes, 1–19.
- Ferrão, P. C. (1998). *Introdução à Gestão Ambiental: a avaliação do ciclo de vida de produtos*. (IST Press, Ed.).
- First, W. (2013a). Arrefecedores | Wood First. Retrieved from <http://www.woodfirst.pt/arrefecedores>
- First, W. (2013b). Granuladoras | Wood First. Retrieved from <http://www.woodfirst.pt/granuladoras>
- First, W. (2013c). Moinhos de martelos refinadores | Wood First. Retrieved from <http://www.woodfirst.pt/moinhos-martelos-refinadores>
- First, W. (2013d). Secadores de tambor| Wood First. Retrieved from <http://www.woodfirst.pt/secadores-tambor>
- GmbH, G. (2017). *openLCA 1.7 - Comprehensive User Manual*.
- GmbH, G. (2018). OpenLCA. Retrieved from <http://www.openlca.org/>
- GmbH, G. (2019a). OpenLCA Nexus - Bandrockner, Trocknung von nassvermahlenem Industrierestholz von 35% Wassergehalt auf 10%, frei Pelletierung. Retrieved from <https://nexus.openlca.org/search/>
- GmbH, G. (2019b). OpenLCA Nexus - Hacken mit stationärem Hacker, Industrierestholzhackschnitzel, ab Sägewerk. Retrieved from <https://nexus.openlca.org/search/>
- GmbH, G. (2019c). OpenLCA Nexus - Hackschnitzel-Kessel 800 kW, Landschaftspflegeholz, ab Anlage. Retrieved from <https://nexus.openlca.org/search/>
- GmbH, G. (2019d). OpenLCA Nexus - Landschaftspflegeholz Hackschnitzel (Wassergehalt 42%) Transport, frei Hackschnitzel-Lager (800 kW Kessel). Retrieved from <https://nexus.openlca.org/search/>
- GmbH, G. (2019e). OpenLCA Nexus - Nassvermahlung Industrierestholz (35% Wassergehalt), frei Trockner. Retrieved from <https://nexus.openlca.org/search/>
- GmbH, G. (2019f). OpenLCA Nexus - Pelletierung Industrierestholz, A1 Holzpellets (9% Wassergehalt),

- ab Pelletierung. Retrieved from <https://nexus.openlca.org/search/>
- GmbH, G. (2019g). OpenLCA Nexus - Sand 0/2, production mix, at plant, wet and dry quarry, undried. Retrieved from <https://nexus.openlca.org/search/>
- GmbH, G. (2019h). OpenLCA Nexus -Bereitstellung mit mobilem Hacker, Landschaftspflegeholz hackschnitzel, ab Anfall. Retrieved from <https://nexus.openlca.org/search/>
- Hamburg, I. (2019). Umberto. Retrieved from <https://www.ifu.com/en/umberto/lca-software/>
- Hauschild, M. Z., & Huijbregts, M. A. J. (2015). *Life Cycle Impact Assessment*. <https://doi.org/10.1007/978-94-017-9744-3>
- IGM, (1999). Métodos de Desmonte a Céu Aberto. In *Regras de Boa Prática no Desmonte a Céu Aberto*. Retrieved from [https://www.Ineg.pt/CienciaParaTodos/edicoes\\_online/diversos/boa\\_pratica/texto#capitulo2](https://www.Ineg.pt/CienciaParaTodos/edicoes_online/diversos/boa_pratica/texto#capitulo2)
- IPQ, (2012) NP EN 197-1, Cimento - Parte 1: Composição, especificações e critérios de conformidade para cimentos correntes.
- IPQ, (2017). NP EN 998 -1, Especificação de argamassas para alvenarias. Parte 1: Argamassas para rebocos interiores e exteriores.
- ISO, (2006) ISO 14040:2006, Environmental management — Life cycle assessment — Principles and framework. <https://doi.org/10.1021/es0620181>
- ISO, (2006) ISO 14044:2006, 2006 Environmental management — Life cycle assessment — Requirements and guidelines. <https://doi.org/10.1007/s11367-011-0297-3>
- Jornal de Noticias (2018). No Title. Retrieved from <https://www.jn.pt/local/noticias/evora/borba/corpos-resgatados-quem-sao-as-vitimas-da-derrocada-em-borba-10264566.html>
- Klöpper, W. (2014). *Background and Future Prospects in Life Cycle Assessment*. (F. Springer, Ed.).
- Langer, W. H. (1993). *Natural Aggregates of the Conterminous United States*. U.S. Geological Survey Bulletin 1594.
- Langer, W. H., Drew, L. J., & Sachs, J. S. (2004). *Aggregate and Environment*. Alexandria: American Geological Institute.
- Librelotto, D., & Jalali, S. (2008). Aplicação de uma Ferramenta de Análise do Ciclo de Vida em Edificações Residenciais - Estudos de Caso. *Engenharia Civil*, (30), 5–20.
- Mantha, V., Monteiro, E., & Rouboa, A. (2013). The feasibility of biomass pellets production in portugal. *Energy Sources, Part B: Economics, Planning and Policy*, 8(1), 28–34.

<https://doi.org/10.1080/15567249.2011.608414>

MAOTDR, (2006) D. R. Decreto-Lei 178/2006 de 5 de setembro do Ministério do Ambiente do Ordenamento do Território e do Desenvolvimento Regional, Pub. L. No. Diário da República, 1.ª série — N.º 171.

MAOTDR, (2009) D. R. Decreto-Lei nº 183/2010 de 10 de Agosto do Ministério do Ambiente, do Ordenamento do Território e do Desenvolvimento Regional, Pub. L. No. Diário da República, 1.ª série — N.º 153, 5170.

MAOTDR, (2010) D. R. Decreto-Lei nº 10/2010 de 4 de Fevereiro do Ministério do Ambiente e do Ordenamento do Território, Pub. L. No. Diário da República, 1.ª série — N.º 24.

MAOTDR, (2011) D. R. Decreto-Lei n.º 73/2011 de 17 de Junho do Ministério do Ambiente e do Ordenamento do Território, Pub. L. No. Diário da República, 1.ª série — N.º 116.

Martinho, P. A. G. (2017). *Análise do comportamento de argamassas com a incorporação de “ pellets ” de madeira*, Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil. Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa.

Ministério do Ambiente, (2006). Regime geral da gestão de resíduos - Decreto-Lei n.º 178/2006. *Diário Da República*, n.º 178/20(Série I de 2006-09-05), 6526–6545. Retrieved from <https://data.dre.pt/eli/dec-lei/178/2006/09/05/p/dre/pt/html>

Monteiro, D. F. P. (2017). *Argamassas de cal hidráulica com resíduos de madeira na conservação de edifícios Influência da granulometria*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa.

NBM&CW. (2019). Alternative Sand: An Inevitable Resource to River Sand. Retrieved from <https://www.nbmcw.com/equipments/crushing-mining-equipments/40169-alternative-sand-an-inevitable-resource-to-river-sand.html>

NIST. (2019). BEES. Retrieved from <https://www.nist.gov/services-resources/software/bees>

Nunes, P. J. (2010). *Recursos Geológicos não metálicos : Prospecção , Pesquisa , Exploração (‘ rochas industriais , argilas , areias , ornamentais ’)*. Dissertação de Mestrado em Engenharia de Minas, Instituto Superior Técnico.

Oliveira, J. F. S. (2005). *Gestão Ambiental*. (Lidel, Ed.).

Padmalal, D., & Maya, K. (2014). *Sand Mining*. Dordrecht: Springer Netherlands. <https://doi.org/10.1007/978-94-017-9144-1>

Pato, P. A. M. (2015). *Análise do Ciclo de Vida do Cimento Caso de Estudo : Fábrica da Secil-Outão*.

- Pinho, F. F. (2016). *Materiais de Construção 2 - Argamassas - Slides de apoio às aulas*, Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade Nova de Lisboa, 1–46.
- Pré-Consultants. (2019). SimaPro. Retrieved from <https://simapro.com/about/>
- Público, J. (2004). *Extracção de areias foi a causa da queda da ponte de Entre-os-Rios*. Retrieved from <https://www.publico.pt/2004/02/05/sociedade/noticia/extracao-de-areias-foi-a-causa-da-queda-da-ponte-de-entresrios-1185248>
- Renascença. (2016). No Title. Retrieved from <https://rr.sapo.pt/2016/03/04/pais/quinze-anos-depois-de-entre-os-rios-pontes-portuguesas-nao-representam-risco/noticia/48455/>
- Ribeiro, J. (2012). *Sustentabilidade dos produtos de construção-aplicação da análise do ciclo de vida a um perfil de alumínio*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Faculdade de Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa.
- Sá, A. J. F. (2009). *Caracterização da Recolha de Matéria-Prima para a Produção de Pellets*. Tese de Mestrado em Engenharia Mecânica, Universidade de Aveiro.
- Secil. (2003). *Processo de fabrico de Cimento*. Retrieved from <http://www.secil.pt/pdf/Processo de Fabrico de Cimento.pdf>
- Silva, A. P. M. R. (2017). *Impacte de argamassas com pellets de madeira no desempenho energético de um edifício residencial – modelação numérica e experimental*. Tese de Mestrado em Engenharia Civil, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa.
- Thinkstep. (2019). Overview. Retrieved from <http://www.gabi-software.com/international/overview/what-is-gabi-software/>
- Torgal, F., & Jalali, S. (2010). *A sustentabilidade dos materiais de construção*. (TecMinho, Ed.) (Vol. 40). <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2008.05.004>
- UNEP, (2014). Sand , rarer than one thinks. *Global Environmental Alert Service (GEAS)*.
- Veiga, M. R., & Faria, P. (1990). *Revestimentos de ligantes minerais e mistos com base em cimento, cal e resina sintética*. LNEC – Procº 083/11/9348.



## ANEXO I

*Tabela 7.1 - Equivalência entre os fluxos de emissões e os fluxos do software OpenLCA, com a respetiva alocação em %*

Fluxos de emissões no ICV	Fluxos de entrada ELCD	%
Óxidos de Carbono (COx)	"Carbon dioxide"	100
	"Carbon dioxide, fossil"	100
	"Carbon monoxide"	100
Óxidos de enxofre (SOx)	"Sulfur dioxide"	100
	"Sulfur oxides"	100
Óxidos de nitrogénio (NOx)	"Nitrogen oxide"	100
	"Dinitrogen monoxide"	100
	"Nitrogen dioxide"	100
	"Nitrogen oxides"	100
Ácido clorídico (HCl)	"Hydrogen chloride"	100
Ácido fluorídrico (HF)	"Hydrogen fluoride"	100
Amoníaco (NH <sub>3</sub> )	"Ammonia"	100
Metano (CH <sub>4</sub> )	"Methane"	100
Metano biogénico (CH <sub>4</sub> )	"Methane, biogenic"	100
Compostos orgânicos voláteis (COV)	"Volatile organic compounds"	100
Compostos orgânicos voláteis não-metânicos (COVNM)	"Non-methane volatile organic compounds"	100
Partículas	"Particulates"	100
Metais pesados( As; Cd; Cr; Cu; Hg; Ni; Pb, Zn; Tl)	"Arsenic; Cadmium; Chromium; Copper; Mercury; Nickel; Lead; Zinc; Thallium"	100
PCDD/PCDF	"Dioxins and furans, unspecified"	100
Carbono biogénico (C)	"Kohlenstoff, biogen"	100
Hidrocarbonetos Aromáticos Policíclicos (HAP)	"Polycyclic aromatic hydrocarbons"	100
Xileno (C <sub>8</sub> H <sub>10</sub> )	"Xylene"	100
Óxido de zinco (ZnO)	"Zinc oxide"	100
Dissulfeto de carbono (CS <sub>2</sub> )	"Carbon disulfide"	100
Vapor de água (H <sub>2</sub> O)	"Water vapour"	100
Acenafteno (C <sub>12</sub> H <sub>10</sub> )	"Acenaphthene"	100
Acenaftileno (C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> )	"Acenaphthylene"	100
Acetaldeído (C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> O)	"Acetaldehyde"	100
Ácido acético (CH <sub>3</sub> COOH)	"Acetic acid"	100
Acetona (CH <sub>3</sub> (CO)CH <sub>3</sub> )	"Acetone"	100
Acroleína (C <sub>3</sub> H <sub>4</sub> O)	"Acrolein"	100
Acrilonitrila (C <sub>3</sub> H <sub>3</sub> N)	"Acrylonitrile"	100
Alumínio (Al)	"Aluminium"	100
Ião de Amónio (NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> )	"Ammonium, ion"	100
Antraceno (C <sub>14</sub> H <sub>10</sub> )	"Anthracene"	100
Antimónio (Sb)	"Antimony"	100
Trióxido de arsénio (As <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	"Arsenic trioxide"	100

Tabela 7.1 - Equivalência entre os fluxos de emissões e os fluxos do software OpenLCA, com a respetiva alocação em % (Continuação)

Fluxos de emissões no ICV	Fluxos de entrada ELCD	%
Arsina (AsH3)	"Arsine"	100
Bário (Ba)	"Barium"	100
Benzeno (C6H6)	"Benzene"	100
Trimetilbenzeno-1,3,5-tricarboxilato (C12H12O6)	"Benzene, 1,3,5-trimethyl-"	100
Etilbenzeno (C8H10)	"Benzene, ethyl-"	100
Benz(a)antraceno (C18H12)	"Benzo(a)anthracene"	100
Benz(a)pireno (C20H12)	"Benzo(a)pyrene"	100
Benzo(ghi)perileno (C22H12)	"Benzo(ghi)perylene"	100
Benzo(k)fluoranteno (C20H12)	"Benzo(k)fluoranthene"	100
Berílio (Be)	"Beryllium"	100
Boro (B)	"Boron"	100
Brometo (Br-)	"Bromide"	100
Butadieno (C4H6)	"Butadiene"	100
Butano (C4H10)	"Butane"	100
Cálcio (C)	"Calcium"	100
Carbonato (CO3 2-)	"Carbonate"	100
Cloreto (Cl-)	"Chloride"	100
Criseno (C18H12)	"Chrysene"	100
Cobalto (Co)	"Cobalt"	100
COD, Chemical Oxygen Demand ( )	"COD, Chemical Oxygen Demand"	100
Cresol (C7H8O)	"Cresol"	100
Cianeto (CN-)	"Cyanide"	100
Ciclohexano (C6H12)	"Cyclohexane"	100
Decano (C10H22)	"Decane"	100
Dibenz(a,h)antraceno (C22H14)	"Dibenz(a,h)anthracene"	100
Dietilamina (C4H11N)	"Diethylamine"	100
2,3,7,8-tetraclorodibenzeno-p-dioxina (C12H4Cl4O2)	"Dioxins, measured as 2,3,7,8-tetrachlorodibenzo-p-dioxin"	100
Etano (C2H6)	"Ethane"	100
1,2-Dibromoetano (C2H4Br2)	"Ethane, 1,2-dibromo-"	100
1,2-Diclorotetrafluoroetano, CFC-114 (C2Cl2F4)	"Ethane, 1,2-dichloro-1,1,2,2-tetrafluoro-, CFC-114"	100
Etanol (C2H5OH)	"Ethanol"	100



Tabela 7.1 - Equivalência entre os fluxos de emissões e os fluxos do software OpenLCA, com a respetiva alocação em % (Continuação)

Fluxos de emissões no ICV	Fluxos de entrada ELCD	%
Etileno (C2H4)	"Ethene"	100
Cloreto de etila (C2H5Cl)	"Ethene, chloro-"	100
Fluoranteno (C16H10)	"Fluoranthene"	100
Fluoreno (C13H10)	"Fluorene"	100
Fluoreto (F-1)	"Fluoride"	100
Flúor (F)	"Fluorine"	100
Formaldeído (CH2O)	"Formaldehyde"	100
Hélio (He)	"Helium"	100
Heptano (C7H16)	"Heptane"	100
Hexametilenodiamina (C6H16N2)	"Hexamethylene diamine"	100
Hexano (C6H14)	"Hexane"	100
Cianeto de hidrogénio (HCN)	"Hydrocyanic acid"	100
Hidrogénio (H)	"Hydrogen"	100
Brometo de hidrogénio (HBr)	"Hydrogen bromide"	100
Iodeto de hidrogénio (HI)	"Hydrogen iodide"	100
Sulfeto de hidrogénio (H2S)	"Hydrogen sulfide"	100
Hidróxido (OH-)	"Hydroxide"	100
Indeno (1,2,3-cd)pyrene (C22H12)	"Indeno (1,2,3-cd)pyrene"	100
Ferro (Fe)	"Iron"	100
Óxido de Chumbo (IV) (PbO2)	"Lead dioxide"	100
Magnésio (Mg)	"Magnesium"	100
Manganésio (Mn)	"Manganese"	100
Clorodifluorometano, HCFC-22 (CHClF2)	"Methane, chlorodifluoro-, HCFC-22"	100
Clorotrifluorometano, CFC-13 (CClF3)	"Methane, chlorotrifluoro-, CFC-13"	100
Diclorometano, HCC-30 (CH2Cl2)	"Methane, dichloro-, HCC-30"	100
Diclorodifluorometano, CFC-12 (CCl2F2)	"Methane, dichlorodifluoro-, CFC-12"	100
Monoclorometano, R-40 (CH3Cl)	"Methane, monochloro-, R-40"	100
Tetrafluorometano, R-14 (CF4)	"Methane, tetrafluoro-, R-14"	100
Triclorofluorometano, CFC-11 (CCl3F)	"Methane, trichlorofluoro-, CFC-11"	100
Metanol (CH3OH)	"Methanol"	100
Molibdénio (Mo)	"Molybdenum"	100
Naftalina (C10H8)	"Naphthalene"	100

Tabela 7.1 - Equivalência entre os fluxos de emissões e os fluxos do software OpenLCA, com a respetiva alocação em % (Continuação)

Fluxos de emissões no ICV	Fluxos de entrada ELCD	%
Nitrato (NO <sub>3</sub> -)	"Nitrate"	100
Nitrogénio (N)	"Nitrogen"	100
Octano (C <sub>8</sub> H <sub>18</sub> )	"Octane"	100
Paládio (Pd)	"Palladium"	100
Pentano (C <sub>5</sub> H <sub>12</sub> )	"Pentane"	100
Fenantreno (C <sub>14</sub> H <sub>10</sub> )	"Phenanthrene"	100
Fenol (C <sub>6</sub> H <sub>5</sub> OH)	"Phenol"	100
Fosfato (PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> )	"Phosphate"	100
Fosfina (PH <sub>3</sub> )	"Phosphine"	100
Bifenilos Policlorados (C <sub>12</sub> H <sub>10</sub> -nCl <sub>n</sub> , sendo que 1≤n≤10)	"Polychlorinated biphenyls"	100
Potássio (K)	"Potassium"	100
Propano (C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> )	"Propane"	100
1,2-Dicloropropileno (C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> Cl <sub>2</sub> )	"Propane, 1,2-dichloro-"	100
Propeno (C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> )	"Propene"	100
Ácido propanóico (CH <sub>3</sub> CH <sub>2</sub> COOH)	"Propionic acid"	100
Ródio (Rh)	"Rhodium"	100
Escândio (Sc)	"Scandium"	100
Selénio (Se)	"Selenium"	100
Prata (Ag)	"Silver"	100
Sódio (Na)	"Sodium"	100
Estrôncio (Sr)	"Strontium"	100
Estireno (C <sub>8</sub> H <sub>8</sub> )	"Styrene"	100
Sulfato (SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup> )	"Sulfate"	100
Sulfito (SO <sub>3</sub> <sup>-2</sup> )	"Sulfite"	100
Enxofre (S)	"Sulfur"	100
Hexafluoreto de enxofre (SF <sub>6</sub> )	"Sulfur hexafluoride"	100
Telúrio (Te)	"Tellurium"	100
Estanho (Sn)	"Tin"	100
Dióxido de estanho (SnO <sub>2</sub> )	"Tin oxide"	100
Titânio (Ti)	"Titanium"	100
Tolueno (C <sub>7</sub> H <sub>8</sub> )	"Toluene"	100
Vanádio (V)	"Vanadium"	100