



# **Impacte ambiental de argamassas de desempenho térmico melhorado**

**Isabel Filipe Silva dos Anjos Pinto**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em

**Engenharia e Gestão Industrial**

Orientadores: Prof. José Dinis Silvestre  
Prof. Jorge Manuel Calião Lopes de Brito

## **Júri**

Presidente: Prof. Paulo Vasconcelos Dias Correia

Orientador: Prof. José Dinis Silvestre

Vogal: Prof. Manuel Guilherme Caras Altas Duarte Pinheiro

**Novembro de 2015**



## Resumo

O setor da construção é responsável por cerca de 40% do consumo de energia na EU. Torna-se necessário uma mudança e procura de novas soluções nas matérias-primas utilizadas na construção, nos processos produtivos, e no tratamento em fim de vida dos vários componentes de um edifício.

A presente Dissertação tem como objetivo determinar e avaliar os impactes ambientais do Ciclo de Vida de três sínteses de aerogéis subcríticos de sílica que é utilizado como agregado em argamassas para revestimento de parede. Estes aerogéis são produzidos através de secagem subcrítica, um processo mais económico e seguro do que o dos aerogéis supercríticos. A avaliação ambiental foi realizada através da metodologia de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), seguindo as normas ISO 14040, e usando uma abordagem do berço ao portão. Os ciclos de vida destes materiais: foram modelados recorrendo à informação recolhida no laboratório do Centro de Química-Física Molecular do Instituto Superior Técnico; e construídos no *software* de ACV *SimaPro*. Para além desta avaliação, foram também analisados os impactes ambientais de argamassas de referência e argamassas de desempenho térmico melhorado comerciais e laboratoriais, estas últimas com estes aerogéis incorporados.

Concluiu-se que, na ACV dos três aerogéis, a fase mais crítica é a da produção, principalmente devido ao elevado consumo de energia. As argamassas com estes aerogéis também apresentam impactes ambientais elevados. No entanto, é necessário ter em consideração que estes valores dizem respeito à produção em laboratório, o que os torna expectavelmente mais elevados do que se fossem produzidos à escala industrial.

Palavras-chave: aerogel, avaliação do ciclo de vida, argamassas de desempenho térmico melhorado, impacto ambiental.



## **Abstract**

The construction sector accounts for about 40% of the EU energy consumption. Thus, there is a need for change and new solutions must be found for the raw materials used in the construction of buildings and corresponding production processes, and in the end-of-life treatment of the components of the buildings.

The main objective of this dissertation is to determine and evaluate the environmental impacts of the life cycle of three versions of a silica-based aerogel that is used as aggregate in mortars for wall renders. These aerogels are produced using a subcritical drying process, which is more economical and secure than supercritical processes. The environmental assessment was carried out through the Life Cycle Assessment (LCA) methodology, according to the standards of the ISO 14040 series and using a cradle-to-gate approach. These life cycles were: modeled using the information on their production collected in the Center of Molecular Chemico-Physics of Instituto Superior Técnico, Lisbon; built in the LCA software SimaPro. Additionally, the environmental impacts of reference mortars, and industrial and laboratorial thermal mortars (the later with these aerogels in their composition), were analyzed.

The LCA results showed that, for the three versions of the aerogel, the most critical stage is the production phase, mainly due to high energy consumption. The mortars with these aerogels also have high environmental impacts. It is, however, necessary to take into consideration that these values are related to the production of these materials in laboratory, which makes them higher than those expected from production at an industrial scale.

Keyword: aerogel, environmental impact, life cycle assessment, thermal mortars.



## **Agradecimentos**

À FCT (Fundação para a Ciência e a Tecnologia), dado que este trabalho foi desenvolvido no âmbito do projeto de investigação FCT PTDC/ECM/11826/2010 *NANORENDER – Performance of sílica nanoaerogel – based renders*.

Aos Professores José Silvestre e Jorge Brito pela sua orientação, apoio, disponibilidade, e pelas valiosas críticas e opiniões no decorrer desta Dissertação.

À Maria Júlio, António Soares e à Rita Garrido pela disponibilidade na recolha de informação necessária e valiosa para a realização desta Dissertação.

Ao Diogo, por todo o amor, incentivo e apoio.





# Índice

<b>Resumo</b> .....	i
<b>Abstract</b> .....	iii
Agradecimentos .....	v
1. Introdução .....	1
1.1 Considerações iniciais.....	1
1.2 Motivação do estudo.....	1
1.3 Objetivo e metodologia de investigação.....	2
1.4 Estrutura da Dissertação .....	3
2. Revisão da literatura .....	5
2.1 Considerações gerais.....	5
2.2 Avaliação do ciclo de vida.....	5
2.3 Argamassas de desempenho térmico melhorado.....	6
2.3.1 Argamassas com nano materiais.....	12
2.4 Desempenho ambiental .....	13
2.4.1 Aerogéis.....	13
2.4.2 Argamassas de desempenho térmico melhorado.....	13
2.4.3 Argamassas com nano materiais.....	14
3. Metodologia da Avaliação do Ciclo de Vida .....	17
3.1 Introdução .....	17
3.2 Fases da ACV.....	18
3.2.1 Definição do objetivo e do âmbito .....	19
3.2.2 Análise do inventário.....	19
3.2.3 Avaliação do impacte do ciclo de vida (AICV) .....	20
3.2.4 Seleção de categorias de impacte ambiental, indicadores de categoria e modelos de caracterização .....	22
3.2.5 Interpretação.....	25
3.3 Limitações da ACV .....	25
3.4 <i>Software</i> SimaPro .....	26
4. ACV de aerogéis e de argamassas de desempenho térmico melhorado.....	28
4.1 Definição do objetivo e do âmbito .....	28
4.1.1 Unidade funcional .....	28
4.1.2 Fronteiras do sistema .....	28

4.1.3.	Limitações.....	29
4.2.	Avaliação do inventário do ciclo de vida dos aerogéis.....	29
4.2.1.	Síntese dos aerogéis .....	29
4.2.2.	Avaliação dos inventários do ciclo de vida .....	32
4.3.	Avaliação ambiental do ciclo de vida dos aerogéis .....	34
4.3.1.	Aerogel inorgânico .....	36
4.3.2.	Aerogel híbrido em pó (HYB-A) .....	38
4.3.3.	Aerogel híbrido monolítico (HYB-C) .....	39
5.	Mapa comparativo de desempenho ambiental de argamassas de desempenho térmico melhorado.....	60
6.	Conclusões e desenvolvimentos futuros.....	68
	Referências .....	70

## **Anexos**

Anexo Confidencial 4.I - ICV do aerogel inorgânico, AI (monolítico - moído e peneirado posteriormente)

Anexo Confidencial 4.II - ICV do aerogel híbrido hidrofóbico, HYB-C (monolítico - moído e peneirado posteriormente)

Anexo Confidencial 4.III - ICV do aerogel híbrido hidrofóbico, HYB-A (obtido em pó)

Anexo Confidencial 4.IV - Composição das argamassas produzidas em laboratório (kg de matéria-prima por kg de produto acabado)

## Índice de figuras

Figura 1.1. Pegada Ecológica mundial (National Footprint Accounts, 2012).....	1
Figura 3.1. Principais fases do ciclo de vida de um produto (adaptado de Ferrão, 2009) .....	17
Figura 3.2. Fases de uma ACV (ISO 14040, 2006) .....	18
Figura 3.3. Elementos da fase de AICV (ISO 14040, 2006) .....	21
Figura 3.4. Mecanismos ambientais (adaptado de Ferrão, 2009) .....	22
Figura 4.1. Ciclo de vida genérico dos materiais de isolamento térmico (adaptado de Pargana, 2012) .....	28
Figura 4.2. Representação esquemática do processo de preparação dos aerogéis de sílica inorgânicos .....	30
Figura 4.3. Representação esquemática do processo de preparação de aerogéis híbridos monolíticos (HYB-C) .....	31
Figura 4.4. Representação esquemática do processo de preparação dos aerogéis híbridos em pó... ..	32
Figura 4.5. Contribuição relativa das fases (A1-A3) para cada indicador de categoria de impacte ambiental (aerogel inorgânico) .....	37
Figura 4.6. Contribuição relativa das fases (A1-A3) para cada indicador de categoria de impacte ambiental (aerogel HYB-A).....	39
Figura 4.7. Contribuição relativa das fases (A1-A3) para cada indicador de categoria de impacte ambiental (aerogel HYB-C) .....	41
Figura 4.8. Representação gráfica dos impactes ambientais dos aerogéis produzidos no IST e dos aerogéis produzidos por Dowson <i>et al</i> para a categoria de impacte GWP (densidades arbitradas para estes últimos: 175 kg/m <sup>3</sup> e 305 kg/m <sup>3</sup> , a azul e a laranja, respetivamente .....	43
Figura 4.9. Argamassas com melhor desempenho ambiental na categoria AP (kg SO <sub>2</sub> eq) .....	47
Figura 4.10. Argamassas com pior desempenho ambiental na categoria GWP (kg CO <sub>2</sub> eq) .....	48
Figura 4.11. Argamassas com melhor desempenho ambiental na categoria POCP (kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> eq) .....	49
Figura 4.12. Argamassas com pior desempenho ambiental na categoria EP (kg PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> eq) .....	50
Figura 4.13. Argamassas com pior desempenho ambiental na categoria PE-NRe (MJ) .....	51
Figura 4.14. Contribuição relativa das fases (A1-A3) da argamassa #5 para cada indicador de categoria de impacte ambiental .....	52
Figura 4.15. Contribuição relativa das fases (A1-A3) da argamassa #27 para cada indicador de categoria de impacte ambiental .....	53
Figura 4.16. Contribuição relativa das fases (A1-A3) da argamassa #30 para cada indicador de categoria de impacte ambiental .....	54
Figura 4.17. Contribuição relativa das fases (A1-A3) para cada indicador de categoria de impacte ambiental para a argamassa comercial .....	57
Figura 5.1. PE-NRE (nas abcissas, MJ) e POCP (nas ordenadas, kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> eq) para as argamassas produzidas em laboratório e onde cada ponto corresponde à condutibilidade térmica (W/m.°C).....	61
Figura 5.2. PE-NRE (nas abcissas, MJ) e POCP (nas ordenadas, kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> eq) para as argamassas com menor impacte ambiental produzidas em laboratório e onde cada ponto corresponde à respetiva condutibilidade térmica (W/m.°C).....	61

Figura 5.3. PE-NRE (nas abcissas, MJ) e POCP (nas ordenadas, kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> eq) para as argamassas com maior impacte ambiental produzidas em laboratório e onde cada ponto corresponde à respetiva condutibilidade térmica (W/m.°C) .....	62
Figura 5.4. PE-NRE (nas abcissas, MJ) e AP (nas ordenadas, kg SO <sub>2</sub> eq) para as argamassas produzidas em laboratório e onde cada ponto corresponde à condutibilidade térmica (W/m.°C) .....	62
Figura 5.5. PE-NRE (nas abcissas, MJ) e AP (nas ordenadas, kg SO <sub>2</sub> eq) para as argamassas com menor impacte ambiental produzidas em laboratório e onde cada ponto corresponde à respetiva condutibilidade térmica (W/m.°C) .....	63
Figura 5.6. PE-NRE (nas abcissas, MJ) e AP (nas ordenadas, kg SO <sub>2</sub> eq) para as argamassas com maior impacte ambiental produzidas em laboratório e onde cada ponto corresponde à respetiva condutibilidade térmica (W/m.°C) .....	63
Figura 5.7. PE-NRE (nas abcissas, MJ) e GWP (nas ordenadas, kg CO <sub>2</sub> eq) para as argamassas produzidas em laboratório e onde cada ponto corresponde à condutibilidade térmica (W/m.°C) .....	64
Figura 5.8. PE-NRE (nas abcissas, MJ) e GWP (nas ordenadas, kg CO <sub>2</sub> eq) para as argamassas com menor impacte ambiental produzidas em laboratório e onde cada ponto corresponde à respetiva condutibilidade térmica (W/m.°C) .....	65
Figura 5.9. PE-NRE (nas abcissas, MJ) e GWP (nas ordenadas, kg CO <sub>2</sub> eq) para as argamassas com maior impacte ambiental produzidas em laboratório e onde cada ponto corresponde à respetiva condutibilidade térmica (W/m.°C) .....	65
Figura 5.10. PE-NRE (nas abcissas, MJ) e EP (nas ordenadas, kg PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> eq) para as argamassas produzidas em laboratório e onde cada ponto corresponde à condutibilidade térmica (W/m.°C) .....	66
Figura 5.11. PE-NRE (nas abcissas, MJ) e EP (nas ordenadas, kg PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> eq) para as argamassas com menor impacte ambiental produzidas em laboratório e onde cada ponto corresponde à respetiva condutibilidade térmica (W/m.°C) .....	66
Figura 5.12. PE-NRE (nas abcissas, MJ) e EP (nas ordenadas, kg PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> eq) para as argamassas com maior impacte ambiental produzidas em laboratório e onde cada ponto corresponde à respetiva condutibilidade térmica (W/m.°C) .....	67

## Índice de tabelas

Tabela 2.1. Requisitos para argamassas térmicas, no estado endurecido (norma EN 998-1) .....	8
Tabela 2.2. Características das argamassas tradicionais com incorporação de agregados isolantes (adaptado de Melo,H., 2014 e Vale, H., 2014) .....	10
Tabela 2.3. Características das argamassas industriais com incorporação de agregados isolantes ..	11
Tabela 2.4. Característica das argamassas com incorporação de aerogel de sílica.....	12
Tabela 2.5. Etapas detalhadas do ciclo de vida de materiais de construção e comparação do desempenho ambiental (adaptado de Silvestre et al (2013) e NP EN 15643-2) .....	15
Tabela 4.1. Matérias-primas necessárias para a produção das três versões do aerogel .....	33
Tabela 4.2. Origem e forma de transporte das matérias-primas necessárias para a produção das três versões de aerogel .....	34
Tabela 4.3. Resíduos de embalagens de matéria-prima para as três versões de aerogel .....	35
Tabela 4.4. Resíduos de embalagens do produto final para as três versões de aerogel.....	35
Tabela 4.5. Resíduos químicos resultantes da produção do aerogel inorgânico, do HYB-A e HYB-C	35
Tabela 4.6. Categorias de impacte ambiental selecionadas e respetivo indicador .....	36
Tabela 4.7. Resultados da ACV para as fases (A1-A3) para o aerogel inorgânico.....	36
Tabela 4.8. Resultados (%) da AVC para as fases (A1-A3) para o aerogel inorgânico .....	37
Tabela 4.9. Resultados da ACV para as fases (A1-A3) para o aerogel HYB-A .....	38
Tabela 4.10. Resultados (%) da ACV para as fases (A1-A3) para o aerogel HYB-A.....	38
Tabela 4.11. Resultados da ACV para as fases (A1-A3) para o aerogel HYB-C .....	40
Tabela 4.12. Resultados (%) da ACV para as fases (A1-A3) para o aerogel HYB-C .....	40
Tabela 4.13. Comparação dos impactes ambientais das fases A1-A3 para o AI, HYB-A e HYB-C (por kg de produto acabado).....	41
Tabela 4.14. Comparação dos impactes ambientais da fase A1 para o AI, HYB-A e HYB-C (por kg de produto acabado) .....	42
Tabela 4.15. Comparação dos impactes ambientais da fase A3.2 para o AI, HYB-A e HYB-C (por kg de produto acabado) .....	42
Tabela 4.16. Comparação dos impactes ambientais dos aerogéis produzidos no IST e dos aerogéis produzidos por Dowson et al para a categoria de impacte GWP .....	43
Tabela 4.17. Composição das argamassas produzidas no laboratório do IST .....	45
Tabela 4.18. Fonte dos impactes ambientais das matérias-primas utilizadas na síntese das argamassas .....	46
Tabela 4.19. Cinco argamassas com melhor e pior desempenho ambiental para o potencial de acidificação (AP, kg SO <sub>2</sub> eq) .....	47
Tabela 4.20. Cinco argamassas com melhor e pior desempenho ambiental para o potencial de aquecimento global (GWP, kg CO <sub>2</sub> eq).....	48
Tabela 4.21. Cinco argamassas com melhor e pior desempenho ambiental para o potencial de formação fotoquímica de ozono (POCP, kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> eq).....	49
Tabela 4.22. Cinco argamassas com melhor e pior desempenho ambiental para o potencial de eutrofização (EP, kg PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> eq) .....	50

Tabela 4.23. Cinco argamassas com melhor e pior desempenho ambiental para o PE-NRe (MJ) .....	51
Tabela 4.24. Resultados da ACV para as fases (A1-A3) para a argamassa #5.....	52
Tabela 4.25. Resultados da ACV para as fases (A1-A3) para a argamassa #27.....	53
Tabela 4.26. Resultados da ACV para as fases (A1-A3) para a argamassa #30.....	54
Tabela 4.27. Composição da argamassa de desempenho térmico melhorado comercial e respectivos processos no SimaPro .....	55
Tabela 4.28. Resultados da ACV para as fases (A1-A3) para a argamassa comercial .....	56
Tabela 4.29. Resultados da ACV (%) para as fases (A1-A3) para a argamassa comercial .....	56
Tabela 4.30. Cinco argamassas com melhor desempenho ambiental para o PE-NRe, incluindo a argamassa comercial .....	57
Tabela 4.31. Cinco argamassas com melhor desempenho ambiental para o POCP, incluindo a argamassa comercial .....	57
Tabela 4.32. Cinco argamassas com melhor desempenho ambiental para o GWP, incluindo a argamassa comercial .....	58
Tabela 4.33. Cinco argamassas com melhor desempenho ambiental para o EP, incluindo a argamassa comercial .....	58
Tabela 4.34. Cinco argamassas com melhor desempenho ambiental para o AP, incluindo a argamassa comercial .....	58

## Lista de siglas e acrónimos

ACV – Avaliação do ciclo de vida

ADP – *Abiotic Depletion Potential* (Depleção de Recursos Abióticos)

AI – Aerogel inorgânico

AICV – Avaliação do impacte do ciclo de vida

AIT – Argamassa de revestimento de isolamento térmico

AP – *Acidification Potential* (Potencial de Acidificação)

APFAC – Associação Portuguesa dos Fabricantes de Argamassas e ETICS

EP – *Eutrophication Potential* (Potencial de Eutrofização)

EPS – Poliestireno expandido moldado

EU – União Europeia

GWP – *Global Warming Potential* (Potencial de Aquecimento Global)

ICV – Inventário do ciclo de vida

INE – Instituto Nacional de Estatística

ISO – *International Organization for Standardization*

IST – Instituto Superior Técnico

MV – Massa volúmica

Pe-NRe – *Non-regenerative primary energy* (Energia Primária Não Renovável)

ODP – *Ozone Depletion Potential* (Potencial de Depleção da Camada de Ozono)

POCP – *Photochemical Ozone Creation Potential* (Potencial Fotoquímico de Criação de Ozono)

Pe-Re – *Regenerative primary energy* (Energia Primária Renovável)

SimaPro – *System for integrated environmental assessment of products*

SSCAT – Secagem supercrítica a altas temperaturas

SSCBT – Secagem supercrítica a baixas temperaturas

TIRM – *Thermal Insulating Rendering Mortar* (argamassa de desempenho térmico melhorado)





# 1. Introdução

## 1.1 Considerações iniciais

A Comissão Mundial sobre o Meio Ambiente e Desenvolvimento (Relatório Brundtland, 1987) define desenvolvimento sustentável como o “processo que satisfaz as necessidades do presente sem comprometer a capacidade das gerações futuras de suprimir as suas próprias necessidades”. Mas, ao longo dos últimos 40 anos, o consumo da Humanidade tem excedido o que o Planeta consegue dar. Atualmente, o Homem utiliza o equivalente a 1,5 Planetas (Figura 1.1) para apoiar as suas atividades e estima-se que esse valor aumente para 2 Planetas em 2030 (Planeta Vivo, 2014). O consumo excessivo de recursos naturais contribui para a diminuição e extinção de fontes e jazidas, alterações na fauna e na flora (Degani e Cardoso, 2002), poluição do ar e das águas, e emissões de gases de efeito de estufa (Pargana, 2012). O uso extensivo de combustíveis fósseis leva ao aumento da pegada de carbono (*Carbon Footprint*), que contribui em 53% para a pegada ecológica (*Ecological Footprint*) (Planeta Vivo, 2014).

No último século, a população mundial teve um crescimento exponencial, principalmente em África, América Latina e Ásia. A Organização das Nações Unidas prevê que, em 2050, a população mundial seja de 9 mil milhões, aumentando cerca de 2 mil milhões em relação aos valores atuais. Este ritmo de crescimento coloca graves problemas em termos de produção energética, alimentar e recursos naturais. Para assegurar uma qualidade de vida das gerações atuais e futuras, o Homem deve conservar as terras cultiváveis, áreas de pesca, energia e recursos biológicos (Pimentel e Pimentel, 2006).

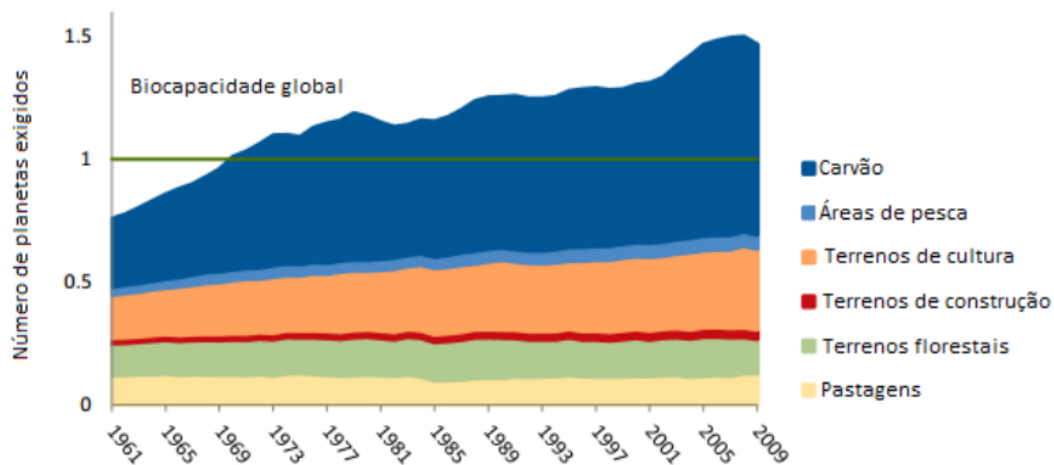


Figura 1.1. Pegada Ecológica mundial (*National Footprint Accounts*, 2012)

## 1.2 Motivação do estudo

A União Europeia tem vindo a estabelecer políticas climáticas e energéticas com vista a reduzir a pegada de carbono. Em Outubro de 2014, estabeleceu novas políticas climáticas e energéticas para serem cumpridas até ao ano de 2030. Estas medidas fazem parte do objetivo da UE em reduzir as emissões de gases de efeito de estufa em 80-95% (em relação aos níveis de 1990), para que o aumento da temperatura da Terra não seja superior a 2 °C (Livro Verde, 2014). Estas são:

- reduzir as emissões de gases com efeito de estufa em pelo menos 40%;
- a energia renovável tem de representar pelo menos 27% da energia total consumida;
- melhorar a eficiência energética em 27%.

Para fazer cumprir estes objetivos, é necessária a cooperação de todos os sectores. O sector industrial, da construção, dos transportes e da agricultura são os que mais contribuem para o elevado consumo de energia (Pargana, 2012). Na União Europeia (EU), o sector da construção é responsável por cerca de 40% do consumo dos recursos naturais (Pinheiro, 2006), 25% da água, 40% da energia e 1/3 das emissões de gases de efeito de estufa (Bragança *et al*, 2013). Torna-se claro que este é um sector insustentável e que existe uma necessidade de mudança e procura de novas soluções, tanto nas matérias-primas utilizadas para a construção do edificado, como nos processos produtivos (das matérias-primas e do produto final), e no tratamento em fim de vida dos vários componentes de um edifício.

O desenvolvimento desta Dissertação visa contribuir para a avaliação ambiental do ciclo devida aplicada à Construção Sustentável. A Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) estuda a relação que existe entre um produto e o meio ambiente, avaliando os aspetos ambientais e os potenciais impactes de cada etapa do seu ciclo de vida. Esta avaliação é importante uma vez que permite identificar oportunidades de melhoria do impacte ambiental, quando comparadas com outras alternativas.

### **1.3 Objetivo e metodologia de investigação**

Esta dissertação está inserida no projeto de investigação FCT - PTDC/ECM/118262/2010: *Nanorender - desempenho de argamassas de revestimento com nanoaerogéis de sílica*. Este projeto investiga o uso de aerogéis à base de sílica em argamassas de revestimento, obtidos através de secagem subcrítica. Este processo é mais económico e seguro do que o dos aerogéis supercríticos.

Na presente Dissertação, foi realizada uma Avaliação ambiental do Ciclo de Vida (ACV) destes nano materiais que são utilizados como agregados em argamassas para revestimento de parede, incidindo principalmente na sua fase de produção. Garrido R. (2015) realizou a Avaliação Económica do Ciclo de Vida das argamassas de desempenho térmico melhorado. A avaliação ambiental foi realizada com recurso ao *software* SimaPro e aplicando as normas europeias mais recentes. A ACV foi realizada para três sínteses do nano material (aerogel inorgânico - patenteado, e dois aerogéis híbridos: um em forma de pó e outro monolítico) produzidas no Centro de Química-Física Molecular (CQFM) do Instituto Superior Técnico (IST) e utilizado como agregado numa argamassa de revestimento de parede com desempenho térmico melhorado. No Laboratório de Construção do Departamento de Engenharia Civil, Arquitetura e Georrecursos (DECivil) do IST, estas versões de aerogel são incorporadas na argamassa. Foi realizada uma ACV para cada argamassa de desempenho térmico melhorado produzida, considerando as várias percentagens de aerogel e de outras matérias-primas que a mesma pode incorporar. Os resultados desta avaliação foram comparados com os de materiais correntes com a mesma função.

No final, foi obtido o desempenho ambiental de aerogéis, em várias versões, e um mapa comparativo das argamassas produzidas em laboratório com materiais correntes, para cada categoria de impacto ambiental e para o isolamento térmico que podem providenciar aos edifícios.

Embora o domínio de investigação se centre mais em Engenharia do Ambiente, a ACV está presente e associada ao domínio da Engenharia e Gestão Industrial, uma vez que, para se realizar a ACV, é necessário conhecer e trabalhar com todos os fluxos e processos, desde a extração da matéria-prima até à sua produção ou tratamento em fim de vida. A avaliação realizada vai ainda permitir conhecer as vantagens e desvantagens ambientais destes métodos de produção em comparação com outros métodos já utilizados para a produção do aerogel e de argamassas de desempenho térmico melhorado.

## **1.4 Estrutura da Dissertação**

Esta dissertação é composta por seis capítulos.

O primeiro capítulo consiste numa breve descrição do estudo e dos seus objetivos. A metodologia e a estrutura da Dissertação são apresentados no final deste capítulo.

O capítulo dois faz o levantamento do trabalho relacionado. Neste capítulo, é dada ênfase ao conceito de ACV e às argamassas de desempenho térmico melhorado com a incorporação de nano materiais e de outros materiais de desempenho térmico melhorado, como é o caso de agregados leves correntes. É também feita referência a estudos de desempenho ambiental de aerogéis à base de sílica e de argamassas de desempenho térmico melhorado.

No capítulo três, é referida a metodologia da ACV, nomeadamente as suas fases e os benefícios e limitações deste método. A metodologia da ACV segue as normas da série ISO 14040, e é usada uma abordagem do berço ao portão da fábrica. Neste capítulo também é feita uma breve descrição do *software* SimaPro.

No quarto capítulo é definido o objetivo e o âmbito do estudo. A unidade funcional e as fronteiras do sistema são declaradas. É apresentada a ACV dos aerogéis produzidos em laboratório, assim como das argamassas com aerogel incorporado e das argamassas com outros componentes. É também apresentada uma comparação entre o desempenho ambiental de cada um destes grupos de materiais.

No capítulo cinco, é realizada uma comparação entre o desempenho ambiental das argamassas produzidas em laboratório e comerciais e a respetiva condutibilidade térmica. Deste modo, é possível apresentar soluções para diferentes decisores com diferentes pontos de vista

No sexto capítulo são apresentadas as conclusões finais desta Dissertação e propostas para desenvolvimento futuro.

Por fim, no final da Dissertação encontram-se as referências bibliográficas que serviram como apoio ao longo do estudo.



## **2. Revisão da literatura**

### **2.1.Considerações gerais**

Desde a década de 90 que se tem vindo a assistir a uma crescente consciencialização ambiental no sector da construção (Silvestre, 2012), quer em novos edificados, quer em reabilitações. A utilização de materiais menos nocivos, reciclados ou com um melhor desempenho energético permite diminuir os impactes ambientais neste sector e contribuir para a diminuição da sua pegada de carbono. Vários estudos tem vindo por isso a ser desenvolvidos para diminuir os impactes ambientais causados por este sector.

### **2.2.Avaliação do ciclo de vida**

Com a crescente sensibilização em relação ao ambiente, é cada vez mais importante determinar os possíveis impactes ambientais associados à utilização de determinados produtos e serviços que são produzidos e consumidos no dia-a-dia. Para uma correta análise, foi necessário desenvolver metodologias que facilitem a avaliação dos correspondentes potenciais efeitos ambientais na saúde humana e no meio ambiente. Uma das metodologias utilizadas é a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV). A ACV está regulamentada a nível nacional e internacional pelas normas ISO 14040 (2006) (princípios e enquadramento) e ISO 14044 (2006) (requisitos e linhas de orientação).

Segundo a norma ISO 14040, a ACV pode ser descrita como uma “compilação das entradas, saídas e impactes ambientais potenciais de um sistema de produto ao longo do seu ciclo de vida”. A ACV avalia cada uma das etapas do ciclo de vida de um produto ou processo e permite uma escolha mais racional dos materiais consoante os seus impactes ambientais ao longo do ciclo de vida dos edifícios, abrindo caminho para uma política mais sustentável.

As normas ISO 14040 e ISO 14044 dividem o estudo de ACV em quatro fases: (1) Definição do objetivo e do âmbito, (2) análise do inventário, (3) avaliação do impacto e (4) interpretação. Estas fases são de seguida sucintamente descritas:

- (1) Definição do objetivo e do âmbito – Nesta fase da ACV, é descrito e definido o produto, processo ou atividade. Contextualiza-se a ACV, define-se os seus objetivos e o campo de aplicação. A definição do objetivo e âmbito tem intenção de limitar a unidade funcional e as fronteiras do sistema;
- (2) Análise do inventário – São recolhidos e processados dados de forma a identificar e quantificar as entradas/saídas de materiais, e energia, do sistema em estudo (ex.: emissões para a atmosfera, deposição de resíduos sólidos, descargas de efluentes). Nesta fase, considera-se que tudo o que entra no sistema tem de sair (ex.: balanço de massas);
- (3) Avaliação do impacto – Na terceira fase da ACV, é feita uma avaliação quantitativa dos efeitos das entradas e saídas de materiais e energia no ambiente e na saúde humana. Os resultados do inventário são posteriormente transformados em impactes ambientais agrupados em categorias;
- (4) Interpretação – A interpretação do ciclo de vida é a última etapa do processo de ACV. Os resultados das fases de Inventário do Ciclo de Vida (ICV) e Análise do Impacte do Ciclo de Vida (AICV) são

discutidos e avaliados, permitindo obter conclusões e recomendações que encaminhem para uma tomada de decisão de acordo com a definição do objetivo e do âmbito do estudo.

Nesta Dissertação, o *software* de ACV a ser usado para realizar a análise é o *SimaPro*. Os impactos ambientais vão ser classificados nas seguintes categorias:

- potencial de aquecimento global: expressa o quanto um determinado volume de um gás com efeito de estufa contribui para o aquecimento global (em kg CO<sub>2</sub> equivalente);
- potencial de acidificação: expressa a formação de ácido sulfúrico que pode afetar os ecossistemas naturais (impactes no solo, água e organismos biológicos). A acidificação é a redução do nível de pH da água e do solo e dá-se pela reação do SO<sub>2</sub> com a água, formando H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (Ácido Sulfúrico);
- potencial de eutrofização: é causado pelo aumento de, por exemplo, nitratos e fosfatos na água e é calculado em kg de fosfato equivalente. Na água, a eutrofização pode contribuir para o aumento da quantidade de algas, diminuindo a quantidade de oxigénio e conseqüentemente matando peixes, afetando negativamente o balanço do ecossistema;
- potencial de destruição da camada de ozono: é a degradação do O<sub>3</sub> na atmosfera por reação química.
- potencial de consumo de recursos abióticos: incide sobre a destruição de recursos naturais e é caracterizado pela destruição de elementos de antimónio como referência;
- potencial de criação fotoquímica de ozono: expressa a contribuição para o aumento de concentrações de ozono na superfície terrestre, que afeta os ecossistemas, a saúde pública e as culturas vegetais;
- consumo de recursos energéticos renováveis;
- consumo de recursos energéticos não-renováveis.

A ACV pode ser aplicada a produtos de construção ou à construção como um todo (Lasvaux *et al*, 2013). Sendo a indústria de construção um sector com um grande consumo de matéria-prima e com processos de fabrico exigentes, a avaliação dos impactos ambientais das alternativas aos materiais normalmente utilizados torna-se essencial. As diretivas europeias para um desenvolvimento sustentável promovem o uso de materiais sustentáveis, de energia renovável e conservação de energia para reduzir a elevada dependência energética (Pires *et al*, 2012). Para cumprir estes objetivos, a indústria de construção deverá, sempre que possível, fechar o ciclo produtivo, minimizando a saída de resíduos e a entrada de matéria-prima não sustentável (Braga, 2014, citando Oliveira, 2007).

### **2.3.Argamassas de desempenho térmico melhorado**

Segundo a Associação Portuguesa dos Fabricantes de Argamassas e ETICS (APFAC), uma argamassa de construção é um produto que resulta da mistura de um agente ligante (cal, cimento ou gesso) com uma carga de agregados (areia ou pó de pedra). Estes produtos podem ser classificados em argamassas de assentamento de alvenaria, argamassas de revestimento de parede (reboco), argamassa para juntas e argamassas para regularização de pavimentos (APFAC). As argamassas podem ser produzidas em estaleiro (argamassas tradicionais) ou em fábrica, (argamassas industriais).

O uso das argamassas tradicionais para construir e revestir muros e paredes é conhecido há mais de 8.000 anos. Este método de produção de argamassas implica o transporte individual de todas as matérias-primas para o estaleiro e a existência de um espaço de armazenamento para as mesmas até à sua utilização. É necessária mão-de-obra adicional para o doseamento das matérias-primas e preparação das argamassas, com poucas garantias acerca da sua consistência ou da sua qualidade (APFAC).

As argamassas industriais surgiram como uma forma de reduzir os custos de mão-de-obra e aumentar a qualidade das argamassas. As argamassas industriais são doseadas e as suas matérias-primas misturadas em fábrica. Estas podem ser pré-misturadas, sendo os componentes doseados e misturados em fábrica e em obra adicionados outros componentes que o fabricante especifica ou também fornece, ou pré-doseadas, sendo os componentes doseados em fábrica e em obra são misturados com água, segundo instruções do fabricante (Melo, 2014, citando Nascimento, 2006). A utilização destas argamassas garante consistência e qualidade das mesmas, uma vez que são produzidas num ambiente controlado, o que diminui a possibilidade de ocorrência de erros humanos (APFAC). As argamassas industriais possibilitam a adição de aditivos e adjuvantes que lhes conferem propriedades específicas e de acordo com a sua funcionalidade.

Apesar da crescente utilização das argamassas industriais, em Portugal, cerca de 84% dos edifícios de habitação são construídos recorrendo a argamassas tradicionais (Flores-Colen citando CENSOS 2011), muitas vezes sem controlo em obra, sendo um dos principais motivos pelos problemas relativos à qualidade das argamassas produzidas em obra (Melo, 2014 citando Monteiro, 2008).

As argamassas de desempenho térmico melhorado, que podem ser também argamassas térmicas, pertencem ao grupo das argamassas de revestimento de parede e surgiram no âmbito da construção sustentável. Têm como objetivo melhorar o conforto térmico e a eficiência energética dos edifícios, reduzindo as trocas de calor entre o meio interior e exterior, sem perder as suas características mecânicas e físicas (Melo, 2014). Estas propriedades são conseguidas através da incorporação de materiais com uma transmissão térmica reduzida nas argamassas. Deste modo, uma argamassa térmica caracteriza-se pela sua condutibilidade térmica reduzida, sem perder as suas funções de revestimento (Melo, 2014). De acordo com a norma EN 998-1 (CEN, 2010), as argamassas térmicas são caracterizadas com base em três propriedades, que se encontram listadas na Tabela 2.1.

Tabela 2.1. Requisitos para argamassas térmicas, no estado endurecido (norma EN 998-1)

	Propriedades	Categoria	Valores
Argamassas térmicas	Resistência à compressão	CSI	0,4 a 2,5 MPa
		CSII	1,5 a 5 MPa
		CSIII	3,5 a 7,5 MPa
		CSIV	≥ 6 MPa
	Absorção de água por capilaridade	W0	Não especificado
		W1	$C \leq 0,4 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{min}^{0,5}$
		W2	$C \leq 0,2 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{min}^{0,5}$
	Condutibilidade térmica	T1	$\leq 0,1 \text{ W/m.K}$
		T2	$\leq 0,2 \text{ W/m.K}$

Os agregados orgânicos (cortiça) e inorgânicos (poliestireno expandido moldado; *expanded polystyrene* - EPS) são usados para conferir propriedades térmicas melhoradas às argamassas. Estes materiais têm uma baixa condutibilidade térmica, o que os torna perfeitos para o isolamento térmico. A cortiça é um material 100% natural, reciclável e renovável e possui uma elevada durabilidade, mantendo todas as suas características ao longo da vida útil do produto (Silvestre *et al*, 2013). O granulado de cortiça surge de desperdícios tais como pó, aparas e rolhas defeituosas (Melo, 2014, citando Gil, 2007 e Fortes, 2004) que são, posteriormente, aproveitados e incorporados nas argamassas. O EPS é um material polimérico termoplástico, que pode ser expandido através da utilização de vapor de água e agentes expansivos. O material expandido é constituído por, aproximadamente, 98% de ar e 2% de poliestireno, o que lhe confere excelentes propriedades isolantes ( $\lambda \approx 0,033 - 0,057 \text{ W/m.}^\circ\text{C}$ ).

Brás *et al* (2013) produziram várias formulações de argamassas com percentagens de incorporação entre 10 e 80%, em volume, de EPS e de cortiça, em substituição de areia. Para as argamassas com 80% de volume em substituição do agregado de areia, os autores observaram uma diminuição de 30% das massas volúmicas aparentes com a incorporação de granulado de cortiça e granulado de EPS, em comparação com a argamassa de referência. Foi ainda observada uma diminuição de cerca de 75% e 60% da condutibilidade térmica para as argamassas com 80% granulado de cortiça e EPS, respetivamente. Estes autores concluíram que o aumento das percentagens de agregados isolantes contribui para a diminuição da condutibilidade térmica das argamassas, sendo mais significativo na substituição pelo agregado de cortiça.

Ali (2011) produziu uma argamassa com incorporação de 85% de granulado de EPS, em volume, em substituição de areia. Observou-se uma diminuição da massa volúmica aparente, no estado endurecido, de 55%, e uma redução de 90% da condutibilidade térmica, em relação à argamassa de referência. De um modo geral, estas reduções são proporcionais à quantidade de EPS incorporada na argamassa.

Martins (2010) produziu argamassas com percentagens de 40, 60, 80 e 100% de granulado de aglomerado de cortiça expandida, sendo as duas últimas argamassas bastardas (cimento e cal hidráulica). Para a argamassa com substituição de 80%, em volume, da areia por granulado de cortiça,



o autor verificou uma redução de 55% da massa volúmica aparente, no estado endurecido, e uma diminuição de cerca de 75% da condutibilidade térmica.

A resistência mecânica das argamassas térmicas diminui, no entanto, com o aumento da dosagem de EPS/cortiça. Nas argamassas com EPS incorporado, a diminuição da resistência à compressão é linear com o aumento de EPS, enquanto nas argamassas com granulado de cortiça incorporado a diminuição da resistência é mais significativa. Existe assim necessidade de se adicionar superplastificantes às argamassas térmicas para lhes conferir uma resistência mecânica adequada (Vale, 2014).

As características das argamassas tradicionais e industriais com incorporação de materiais isolantes são resumidas nas Tabelas 2.2 e 2.3, respetivamente (Melo, H., 2014 e Vale, H., 2014). No que diz respeito às argamassas tradicionais, verifica-se que a massa volúmica aparente, no estado endurecido, varia entre 850 e 1.510 kg/m<sup>3</sup>. Nas argamassas industriais, este valor é inferior, variando entre 250 e 910 kg/m<sup>3</sup>. Todas as argamassas industriais contêm adições / adjuvantes na sua composição (Melo, 2014).

Relativamente ao desempenho térmico, verifica-se que é necessário a incorporação de 70-85% de agregados isolantes (cortiça e EPS) de forma a serem obtidas argamassas de desempenho térmico melhorado (Melo, 2014; Vale, 2014). A condutibilidade térmica destas argamassas varia entre 0,05 e 0,163 W/(m.°C) e 0,16 e 0,63 W/(m.°C) nas argamassas industriais e tradicionais, respetivamente. A condutibilidade térmica sofre uma redução de 60-80% com a substituição da areia por estes materiais.

Tabela 2.2. Características das argamassas tradicionais com incorporação de agregados isolantes (adaptado de *Melo, H., 2014 e Vale, H., 2014*)

Argamassa	Aplicação	Constituintes				$\lambda$ (W/m.°C)	Mv(kg/m <sup>3</sup> )
		Ligante	Agregado		Adjuvantes/Adições		
			Substituição de areia por agregado	Restante composição			
<b>(Referência)</b> <b>Brás et al. (2013)</b>	-	-	(Ref.)	-	Não especificado	1,6	2.050
<b>Brás et al. (2013)</b>	-	Cimento Portland CEM II B/L 32,5 N	80% Cortiça (0,5-2 mm)	Areia siliciosa (0-1 mm)	Superplastificante (PCE)	0,41	1.480
<b>Brás et al. (2013)</b>	-	Cimento Portland CEM II B/L 32,5 N	80% EPS (2 mm)	Areia siliciosa (0-1 mm)	Superplastificante (PCE)	0,63	1.510
<b>(Ref.) ALI (2011)</b>	-	-	(Ref.)	-	-	1,8	2.138
<b>ALI (2011)</b>	-	Cimento Portland tipo I	85% EPS (2-12 mm)	Areia siliciosa (2,38 mm)	Sílica de fumo (MV 250-350 kg/m <sup>3</sup> ); superplastificante (Sikament 163 M)	0,16	970
<b>(Referência)</b> <b>Martins (2010)</b>	-	-	(Ref.)	-		0,8	1.945
<b>Martins (2010)</b>	-	Cimento / cal hidráulica	80% Cortiça	-	Sem adições	0,198	916,7

Legenda:  $\lambda$  - condutibilidade térmica; Mv - massa volúmica aparente, estado endurecido

Tabela 2.3. Características das argamassas industriais com incorporação de agregados isolantes

Argamassa	Aplicação	Constituintes			Adjuvantes/Adições	$\lambda$ (W/m.°C)	Mv <sub>e</sub> (kg/m <sup>3</sup> )	Mv <sub>p</sub> (kg/m <sup>3</sup> )
		Ligante	Agregado					
			Substituição de areia por agregado	Restante composição				
<b>AI1</b>	Argamassa para reboco interior e exterior	Cal hidráulica NHL 3	Cortiça (0-3 mm)	Cargas diatomáceas	Não especificado	0,045	360±20	-
<b>AI2</b>	Argamassa térmica de revestimento de paredes e tetos	Cal hidráulica natural	Cortiça (0-3 mm)	Terra diatomácea, argila	Aditivos naturais, fibras de polipropileno, introdutores de ar	0,083	470±30	-
<b>AI3</b>	Argamassa térmica para reboco exterior e interior	Cal hidráulica NHL 5	Cortiça (0-4 mm)	Fibras, argila, cargas diatomáceas	Não especificado	0,08	450±10	-
<b>AI4</b>	Reboco de isolamento térmico, aplicado sobre suporte em alvenaria de tijolo	Cal / Cimento branco e ligantes sintéticos	70-80% EPS (1,5-2 mm)	Areia (calcária e siliciosa)	Com adições mas não especificadas	0,07	350±50	-
<b>AI5</b>	Revestimento de isolamento térmico para interiores e exteriores	Cimento Portland	70-80% Cortiça (1,5-2 mm)	Areia (calcária e siliciosa)	Pó redispersível, hidrófugo em pó, agente introdutor de ar e controlo de tração, retentor de água	0,163	900±50	900±50-
<b>AI6</b>	Revestimento isolante térmico para isolamento interior	Cal /CEM I 52,5 N	100% EPS (< 3 mm)	-	Polímero redispersível, hidrófugo, agente expansivo, retentor de água	0,042	500±15	750+30
<b>AI7</b>	Revestimento para isolamento térmico sobre alvenaria em tijolos, blocos, betões, etc.	Ligante hidráulico	EPS	-	Aditivos específicos para melhorar a trabalhabilidade e a aderência	0,083	500	450 ± 75
<b>AI8</b>	Reboco para isolamento térmico de paredes interiores e exteriores	Ligante hidráulico	Pérolas virgens de EPS	-	Não especificado	0,051	-	-
<b>AI9</b>	Argamassa de reboco térmico e acústico para utilização interior e exterior	Ligante hidráulico	Cortiça	Inertes siliciosos	Não especificado	0,065	-	-

Legenda:  $\lambda$  - condutibilidade térmica; Mv<sub>p</sub> – massa volúmica aparente, pasta; Mv<sub>e</sub>- massa volúmica aparente, estado endurecido

### 2.3.1. Argamassas com nano materiais

Os nano materiais são caracterizados pelas suas dimensões estruturais reduzidas, na ordem de  $10^{-9}$  m (nanómetro), cujas propriedades diferem das observadas em maior escala. Quando adicionados ao cimento, nomeadamente nas argamassas, modificam as suas propriedades, afetando a resistência, a durabilidade e a retração do material, aumentando a qualidade e a longevidade das estruturas (Soares *et al*, 2014).

O nano material mais utilizado para melhorar o desempenho térmico das argamassas é o aerogel de sílica (Soares *et al*, 2013; Flores-Colen *et al*, 2013). Os aerogéis de sílica são materiais sólidos sintéticos, porosos e com uma densidade baixa (entre 3 e  $500 \text{ kg/m}^3$ ). Podem ser inorgânicos, orgânicos ou híbridos e são produzidos a partir de um gel, cuja parte líquida é substituída por um gás. Estas características resultam em níveis de porosidade que podem ultrapassar 90%, o que se traduz numa baixa condutibilidade térmica ( $0,01\text{-}0,02 \text{ W/(m.K)}$ ). A sua aplicação na construção deve-se, principalmente, ao seu elevado desempenho térmico.

Stahl *et al* (2011) adicionaram 30-60%, em volume, de grânulos de aerogel de sílica numa argamassa de revestimento, proporcionando valores de  $0,025 \pm 0,002 \text{ W/m.}^\circ\text{C}$  de condutibilidade térmica e uma densidade de  $250 \text{ kg/m}^3$ .

A argamassa industrial A110 apresenta uma condutibilidade térmica de  $0,028 \text{ W/m.}^\circ\text{C}$  e uma densidade de  $220 \text{ kg/m}^3$  [W6].

Na Tabela 2.4, estão sumarizadas as principais características destas argamassas.

Tabela 2.4. Característica das argamassas com incorporação de aerogel de sílica

Argamassa	Constituintes				$\lambda$ (W/m.°C)	Mv <sub>e</sub> (kg/m <sup>3</sup> )
	Ligante	Agregado		Adjuvantes / adições		
		Substituição de areia por agregado	Restante composição			
<b>Stahl <i>et al</i> (2011)</b>	Cal hidráulica NHL 3	30-60% aerogel de sílica	-	-	$0,025 \pm$ $0,002$	250
<b>A110</b>	Cal hidráulica; cimento branco	Granulado de aerogel de sílica	Agregado leve mineral	Não são referidos	0,028	220

Legenda:  $\lambda$  - condutibilidade térmica; Mv<sub>e</sub> - massa volúmica aparente, estado endurecido

Uma das limitações da aplicação do aerogel de sílica nas argamassas é o seu custo elevado quando comparado com revestimentos tradicionais. Vários estudos continuam a ser desenvolvidos para a produção de aerogéis de baixo custo (Soares *et al*, 2014).

Nesta dissertação, o nano material a ser utilizado como agregado em argamassas é o aerogel de sílica, com três composições diferentes – inorgânico, e dois aerogéis híbridos: um em forma de pó e outro monolítico.

## 2.4. Desempenho ambiental

### 2.4.1. Aerogéis

Na pesquisa a bases de dados de referência (de revistas científicas e atas de congressos internacionais), apenas foi encontrado um estudo do desempenho ambiental de um aerogel. Neste estudo, Dowson *et al* (2012) produziram um aerogel de sílica, em laboratório, utilizando altas e baixas temperaturas supercríticas (SSCAT e SSCBT, respetivamente). A ACV foi desenvolvida do berço ao portão da fábrica, excluindo o impacto dos transportes de matérias-primas e produtos acabados, assim como o seu processamento no fim de vida. Este estudo foi realizado segundo as normas ISO 14044 e 14040 e tem como unidade funcional a energia despendida (kWh) e o CO<sub>2</sub> libertado (kg CO<sub>2</sub>) para se produzir 1 m<sup>3</sup> de aerogel sólido (não granular).

Concluiu-se que o método de produção de SSCBT tem um retorno ambiental mais longo, com um consumo total de energia de 62,6 MJ/40 ml e 6,64 kgCO<sub>2</sub>/40 ml de CO<sub>2</sub> libertado. O consumo total de energia e CO<sub>2</sub> libertado na SSCAT é de 29,3 MJ/40 ml e 0,73 kgCO<sub>2</sub>/40ml, respetivamente. O envelhecimento do aerogel foi a fase de produção onde houve mais energia despendida.

À medida que se otimiza o processo para a produção industrial, os valores de energia despendida e CO<sub>2</sub> libertado diminuem significativamente. No entanto, é no método de SSCBT que se verifica uma melhoria mais significativa.

### 2.4.2. Argamassas de desempenho térmico melhorado

O único estudo relativo aos impactes ambientais de argamassas de desempenho térmico melhorado encontrado foi o de Silvestre *et al* (2013). Os autores estudaram o impacto ambiental, económico e energético de uma argamassa de revestimento de Isolamento Térmico (AIT; *Thermal Insulating Rendering Mortar – TIRM*), com granulado de cortiça como agregado leve. Foi realizada uma ACV do berço-ao-berço (C2C - *Cradle to cradle*), de acordo com as normas ISO 14040 e ISO 14044, sendo a unidade de comparação utilizada “1 m<sup>2</sup> de parede exterior por um período de 50 anos após a reabilitação energética (aplicação da AIT)”. Os impactes ambientais incidiram na pegada de carbono (“Potencial de Aquecimento Global” – GWP) e no consumo de energia primária renovável e não renovável dos materiais utilizados na renovação energética das paredes exteriores nos 50 anos seguintes, de um edifício modelo.

Para ser possível quantificar os efeitos da reabilitação energética com a introdução da AIT, os autores fizeram as seguintes considerações:

- duas soluções de referência, sem isolamento, a serem reabilitadas: uma parede simples e uma parede dupla;
- reabilitadas – foram consideradas três alternativas para a aplicação da AIT: nas paredes de referência pelo exterior, interior ou em ambas as faces da parede, com espessuras de até 0,10 m em cada face;
- manutenção, substituição e reparação – para o revestimento externo (ECS): limpeza total e pintura a cada 5 anos e reparação de 25% da área a cada 25 anos; para o revestimento interno (ICS): limpeza total e pintura a cada 5 anos e reparação de 5% da área a cada 10 anos; superfícies onde

não houve aplicação de AIT: foram definidas como 2 cm de reboco e tinta à base de água, para o revestimento interno e externo.

Os resultados obtidos na comparação ambiental e de consumo de energia relativos às emissões de carbono de cada uma das diferentes fases do ciclo de vida estão na Tabela 2.5.

Os autores concluíram que as paredes com aplicação de AIT apresentam uma condutibilidade térmica inferior ( $\lambda = 0,095 \text{ W/m}\cdot\text{°C}$ ) quando comparadas com as paredes de referência (sem aplicação de AIT), o que se traduz num melhor desempenho energético durante a fase de utilização e, conseqüentemente, na diminuição dos impactes ambientais e económicos nesta fase. As paredes com aplicação de AIT apresentam impactes ambientais e económicos durante a etapa de produção (A1-A3), o transporte para o local de construção (A4) e nos processos de construção e instalação nos edifícios (A5). As paredes de referência apresentam um melhor desempenho ambiental e económico na etapa de fim de vida.

A incorporação de AIT nas paredes simples levou a reduções de 7-28% nos custos, no potencial de aquecimento global e energia primária não renovável. Nas paredes duplas, a redução dos custos, potencial de aquecimento global e energia primária não renovável foi de 1-16%.

#### **2.4.3. Argamassas com nano materiais**

Não foram encontrados estudos relacionados com os impactes ambientais da aplicação de nano materiais em argamassas para melhorar o desempenho térmico das mesmas. Foram realizadas pesquisas sobre o tema no *sciencedirect* ([www.sciencedirect.com](http://www.sciencedirect.com)) com as palavras-chave “LCA mortar”, “LCA mortar nano” e “LCA aerogel”.

Tabela 2.5. Etapas detalhadas do ciclo de vida de materiais de construção e comparação do desempenho ambiental (adaptado de Silvestre *et al* (2013) e NP EN 15643-2)

Fronteira ACV		Etapas do ciclo de vida	Designação e descrição das fases do ciclo de vida		D.A. (GWP)
Berço ao Berço	Berço ao Portão	Etapa de produção (A1-A3)	A1	Extração e processamento de matérias-primas, processamento de materiais secundários	74-93%
			A2	Transporte	
			A3	Produção	
	A4	Transporte para o local de construção			
		A5	Processos de construção e instalação no edifício		
	Etapa de utilização - Acções de manutenção (B1-B5)	B1	Utilização	4-24%	
		B2	Manutenção		
		B3	Reparação		
		B4	Substituição		
		B5	Reabilitação		
	Etapa de utilização – Operações do edifício (B6-B7)	B6	Utilização operacional de energia		
		B7	Utilização operacional de água		
	Etapa de fim de vida (C1-C4)	C1	Desconstrução	1%	
		C2	Transporte		
		C3	Processamento de resíduos		
		C4	Eliminação		
		Benefícios e cargas ambientais para além das fronteiras do sistema	D	Potencial de reutilização, recuperação e reciclagem (3R)	2%

Legenda: D.A. – comparação do desempenho ambiental relativos às emissões de carbono (expressas pelo GWP)





### 3. Metodologia da Avaliação do Ciclo de Vida

#### 3.1.Introdução

Com a crescente sensibilização em relação ao ambiente, houve necessidade de se criar ferramentas para avaliar os possíveis impactes ambientais associados à utilização de processos, produtos e serviços que são produzidos e utilizados no dia-a-dia. A Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) – *Life Cycle Assessment (LCA)* – é uma técnica que tem como objetivo a avaliação do potencial impacte ambiental que está associado a um processo, produto ou serviço ao longo de todo o seu ciclo de vida. Esta abordagem, quando aplicada do “berço ao túmulo” (*cradle-to-grave*), analisa todas as fases do ciclo de vida desde a extração das matérias-primas até ao tratamento em fim de vida e destino final do produto, passando pelas fases intermédias de fabrico de materiais acessórios e produção de energia, produção, transporte e utilização. A ACV está regulamentada pela ISO (*International Organization for Standardization*), que dedicou a série de normas ISO 14040 à ACV (Pinheiro, 2006; Ferrão, 2009). Destaca-se a norma ISO 14040 (2006) que define os princípios e enquadramento e a ISO 14044 (2006) que define os requisitos e linhas de orientação. A Figura 3.1 ilustra as principais fases do ciclo de vida de um produto.

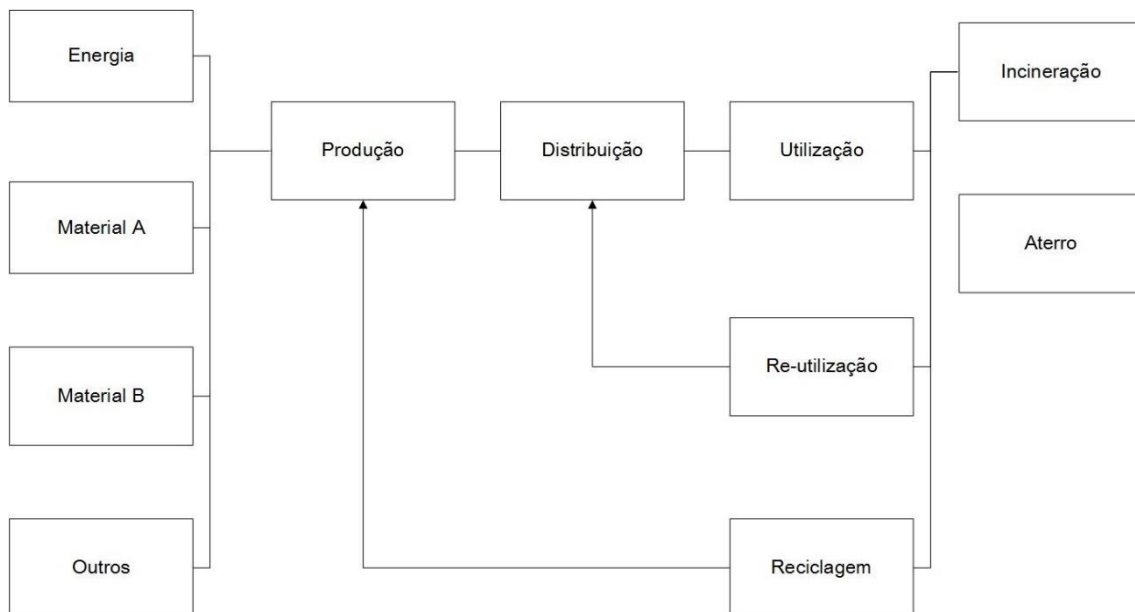


Figura 3.1. Principais fases do ciclo de vida de um produto (adaptado de Ferrão, 2009)

A ACV baseia-se no conceito de que qualquer processo, produto ou serviço produz impactes no meio ambiente, desde a extração das matérias-primas necessárias para a sua produção até ao momento em que são devolvidas à Natureza ou reintegradas no ciclo de produção (Ferrão, 2009). Esta metodologia é particularmente útil na identificação de oportunidades de melhoria do desempenho ambiental dos processos e produtos nas várias fases do seu ciclo de vida; no apoio à decisão na indústria, em organizações governamentais e não-governamentais; na seleção de indicadores de desempenho ambiental relevantes; no *marketing* (ISO 14040, 2006).

### 3.2.Fases da ACV

As normas ISO dividem o estudo de ACV em quatro fases: (1) definição do objetivo e do âmbito; (2) análise do inventário; (3) avaliação do impacto e (4) interpretação (Figura 3.2):

1. **Definição do objetivo e do âmbito:** nesta fase da ACV, é descrito e definido o produto, processo ou atividade. Contextualiza-se a ACV, define-se os seus objetivos e o campo de aplicação. A definição do objetivo e âmbito tem intenção de limitar a unidade funcional e as fronteiras do sistema;
2. **Análise do inventário:** são recolhidos e processados dados de forma a identificar e quantificar as entradas / saídas de materiais, e energia, do sistema em estudo (ex.: emissões para a atmosfera, deposição de resíduos sólidos, descargas de efluentes). Nesta fase, considera-se que tudo o que entra no sistema tem de sair (ex.: balanço de massas);
3. **Avaliação do impacto:** na terceira fase da ACV, é feita uma avaliação quantitativa dos efeitos das entradas e saídas de materiais e energia no ambiente e na saúde humana. Os resultados do inventário são posteriormente transformados em impactes ambientais agrupados em categorias;
4. **Interpretação:** a interpretação do ciclo de vida é a última etapa do processo de ACV. Os resultados das fases de Inventário do Ciclo de Vida (ICV) e Análise do Impacte do Ciclo de Vida (AICV) são discutidos e avaliados, permitindo obter conclusões e recomendações que encaminhem para uma tomada de decisão de acordo com a definição do objetivo e do âmbito do estudo.

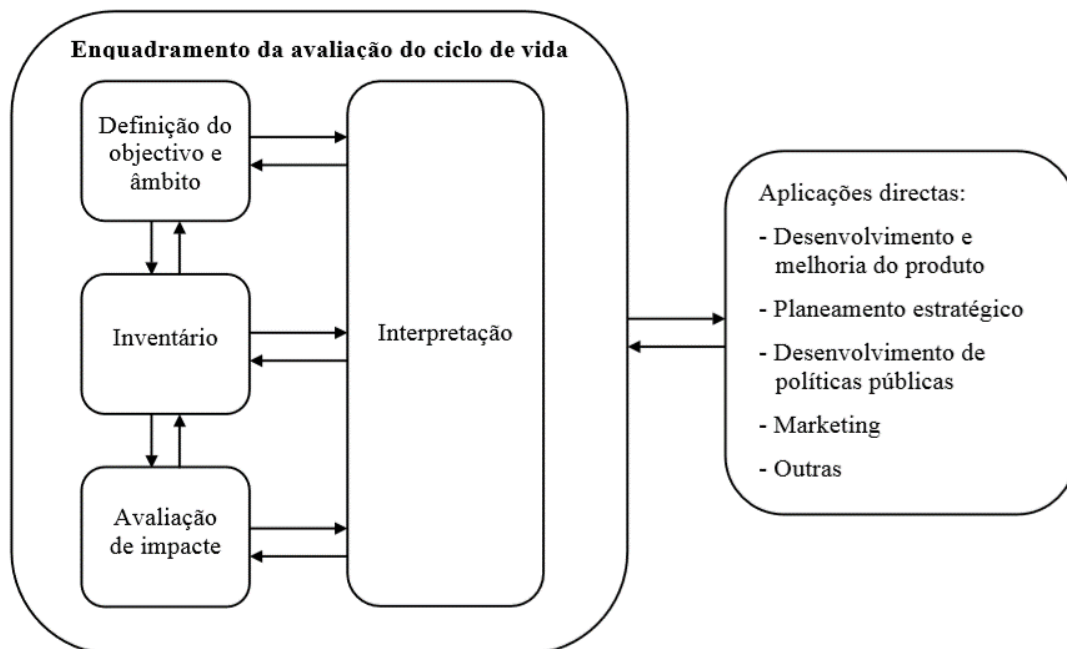


Figura 3.2. Fases de uma ACV (ISO 14040, 2006)

### 3.2.1. Definição do objetivo e do âmbito

A primeira fase da ACV consiste na definição dos objetivos e do âmbito do estudo, da função, da unidade funcional e das fronteiras do sistema e no estabelecimento de um procedimento que assegure a qualidade do estudo.

Segundo a Norma ISO 14040, “o **objetivo** da ACV deve estabelecer a aplicação pretendida; as razões para a realização do estudo; o público-alvo, i.e. a quem se pretende comunicar os resultados do estudo; e se os resultados se destinam a ser utilizados em afirmações comparativas para divulgação pública”.

Para assegurar que se atinge o objetivo, o **âmbito** deverá ser bem definido e com o detalhe necessário para atingir o fim proposto. Na definição do âmbito de um estudo de ACV, devem estar descritos: “o sistema a estudar; as funções do sistema ou produto; a unidade funcional; a fronteira do sistema; procedimentos de alocação; categorias de impacto selecionadas e metodologia da avaliação de impacto, e interpretação subsequente a ser utilizada; requisitos dos dados; pressupostos; limitações; requisitos da qualidade dos dados iniciais; tipo de revisão crítica, se existente; tipo e formato do relatório requerido para o estudo” (ISO 14040).

Um sistema poderá ter várias **funções** e as selecionadas para o estudo do ciclo de vida dependem do objetivo e do âmbito do estudo.

A **unidade funcional** é definida pelo desempenho quantificado de um sistema de produto para utilização como unidade de referência e tem como principal objetivo fornecer uma referência (base comum) que relacione as entradas e as saídas do sistema. Deste modo, a comparabilidade dos resultados da ACV é assegurada.

A **fronteira do sistema** define os processos unitários que vão ser incluídos no sistema em estudo, tais como a obtenção de matérias-primas, distribuição e transporte, produção e utilização de combustíveis, eletricidade e calor, utilização e manutenção de recursos, recuperação de produtos usados, entre outros. De acordo com a norma ISO 14040, estes processos estão “dependentes da definição do objetivo e do âmbito do estudo, da aplicação e do público pretendido, dos pressupostos, das restrições de dados e custos, e dos critérios de exclusão.” Os critérios utilizados na definição da fronteira do sistema vão-se refletir no nível de confiança dos resultados do estudo.

Segundo a norma ISO 14040, os requisitos de **qualidade dos dados** especificam as características dos dados necessários para o estudo. A descrição da qualidade dos dados é importante para a fiabilidade do estudo e para a correta interpretação dos resultados.

### 3.2.2. Análise do inventário

A segunda fase da ACV é aquela que mais recursos e tempo consome e consiste na recolha e processamento de informação de forma a identificar e quantificar as entradas e saídas relevantes de um sistema de produto. Durante o inventário, é necessário percorrer várias etapas: (1) representação do sistema através de um diagrama de blocos; (2) recolha de informação; (3) validação e processamento dos dados; (4) multifuncionalidade.

Devido à quantidade de fluxos e iterações entre processos num sistema, a sua compreensão pode ser complexa. O **diagrama de blocos** permite obter uma visão simples e global do ciclo de vida

em estudo, em que os principais processos são representados por blocos e estão ligados entre si por setas, que representam fluxos de massa e de energia. A construção do diagrama inicia-se com a identificação das fases mais relevantes do processo de fabrico do produto e dos respetivos fluxos de massa e de energia (Ferrão, 2009).

Depois de se obter o diagrama de blocos, inicia-se o processo de **recolha de informação**. Neste processo, estão incluídas as entradas de energia, matérias-primas e outras entradas físicas; produtos, coprodutos e resíduos; distribuição e transporte; emissões para o ar, descargas para a água e para o solo. De acordo com a ISO 14041, devem ser integrados critérios com base no nível de contribuição mássica, energética e ambiental (Ferrão, 2009 citando ISO 14041). À medida que se vai obtendo os dados, pode-se verificar que é necessário decompor alguns processos em subprocessos. Da mesma forma, pode ser necessário agrupar outros processos devido à falta de informação necessária para cada um deles, o que vai condicionar os resultados do estudo. É necessário ter em consideração o nível de detalhe dado a cada processo, uma vez que, à medida que este aumenta, os recursos consumidos também aumentam e a influência nos resultados finais pode ser muito reduzida. Nesta dissertação, os dados foram recolhidos com recurso a questionários às pessoas envolvidas na produção do aerogel e das argamassas de desempenho térmico melhorado.

Após a recolha de informação, é necessário **validar os dados** recolhidos, verificando se a qualidade e quantidade dos mesmos está de acordo com as expectativas iniciais e dentro do objetivo do âmbito do sistema, assim como redefinir as fronteiras do sistema, caso seja necessário. Assim que as fronteiras definitivas são definidas, dá-se início ao **processamento dos dados**. O processamento dos dados e a modelação do processo produtivo são realizados com o apoio de um *software*. Os dados de cada processo do ciclo de vida são quantificados e agrupados por substâncias, dando origem a uma tabela de inventário (Ferrão, 2009) – por exemplo, as emissões de CO<sub>2</sub> identificadas nos processos elementares são apresentadas na tabela de inventário como “x kg de CO<sub>2</sub>”.

A **multifuncionalidade** é comum em grande parte dos processos industriais (Pargana, 2012). A multifuncionalidade ocorre quando uma unidade industrial produz mais do que um produto ou quando são produzidos vários subprodutos aquando a produção de determinado produto. Nesses casos, é necessário aplicar regras de imputação/alocação, atribuindo um peso pelo impacto ambiental ao produto em estudo (Ferrão, 2009).

### 3.2.3. Avaliação do impacte do ciclo de vida (AICV)

Na terceira fase da ACV, é feita uma avaliação quantitativa e/ou qualitativa dos potenciais impactes ambientais, utilizando os resultados do ICV. A avaliação do impacte do ciclo de vida conta com as seguintes etapas, ilustradas na Figura 3.3 (ISO 14040, 2006):

1. Seleção das categorias de impacte ambiental, indicadores de categoria, modelos de caracterização;
2. Classificação, onde se deve especificar quais as intervenções que contribuem para cada categoria de impacte ambiental;
3. Caracterização, cálculo dos resultados dos indicadores de categoria;
4. Elementos opcionais (Normalização, agregação e ponderação).

## AVALIAÇÃO DE IMPACTE DO CICLO DE VIDA

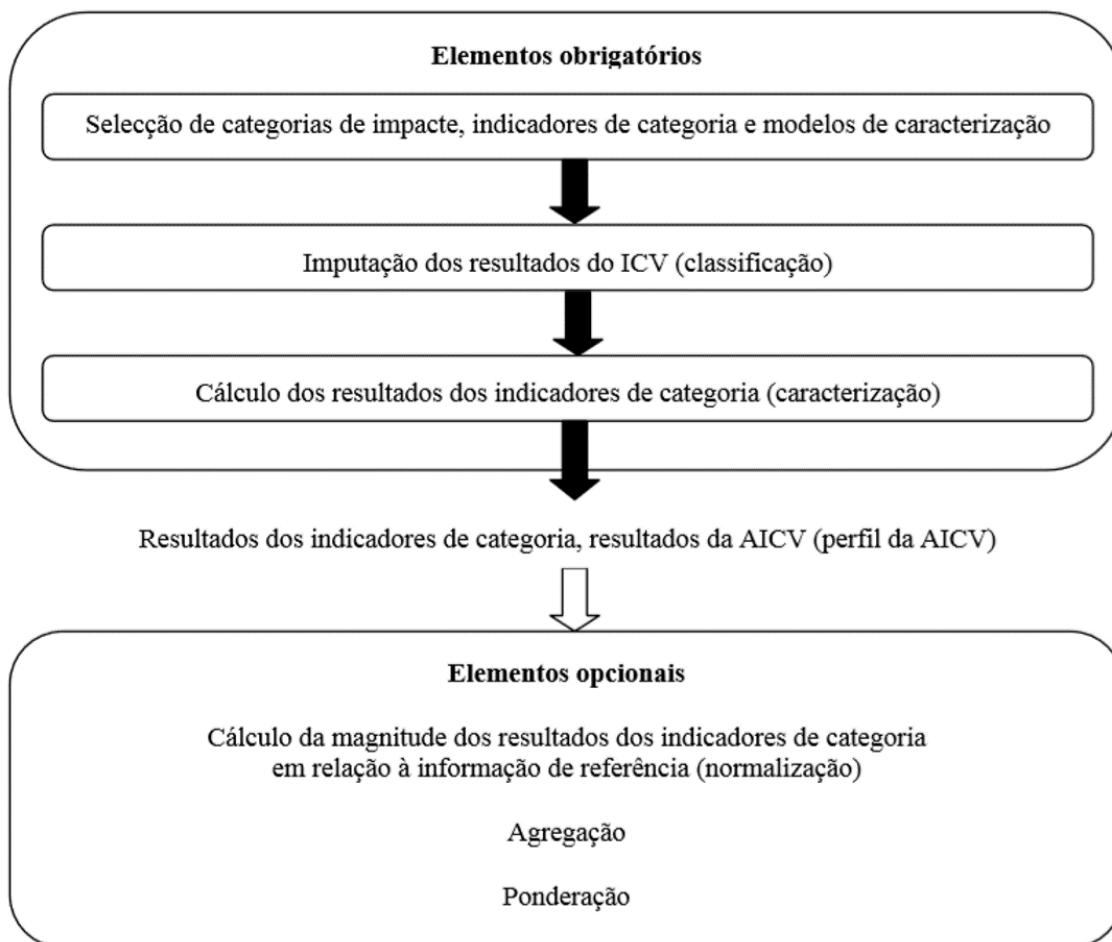


Figura 3.3. Elementos da fase de AICV (ISO 14040, 2006)

### 3.2.4. Seleção de categorias de impacto ambiental, indicadores de categoria e modelos de caracterização

A seleção das categorias de impacto ambiental é o primeiro passo na avaliação dos impactos ambientais e a sua escolha deve estar de acordo com o objetivo e com o âmbito do estudo (Paulsen, 2001). O termo “mecanismo ambiental” é utilizado para definir a forma como os sistemas físicos, químicos e biológicos transformam os resultados do inventário em categorias de impacto ambiental (Figura 3.4). Esta definição é feita através da quantificação de dois tipos de indicadores - os intermédios e os finais. Os indicadores intermédios quantificam as propriedades mais próximas da intervenção ambiental, tais como o *smog*, efeito de estufa, acidificação, eutrofização, entre outros. Por sua vez, os indicadores finais quantificam as propriedades mais próximas do impacto ambiental, tal como cancro, doenças respiratórias, nível do mar, redução da biodiversidade e perda de recursos (Ferrão, 2009). A escolha do método de avaliação dos impactos ambientais deve estar relacionada com a seleção das categorias de impacto ambiental, uma vez que estes estão associados a um conjunto de categorias de impacto ambiental (Ferrão, 2009).

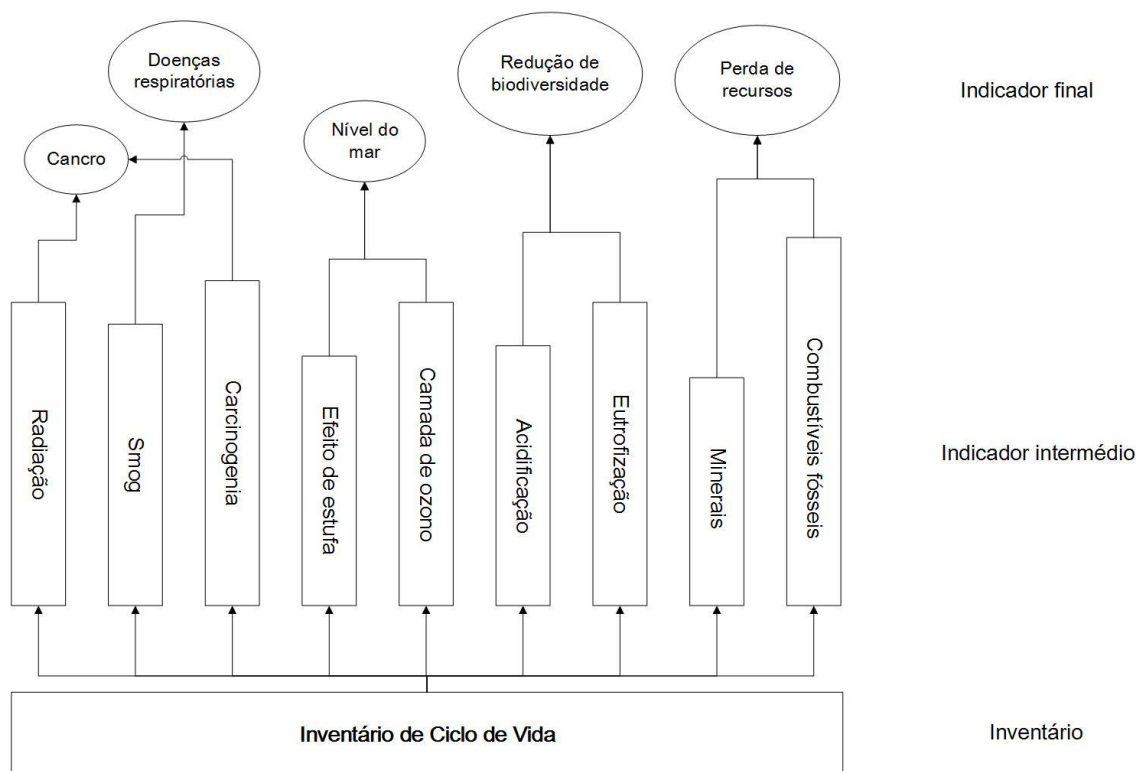


Figura 3.4. Mecanismos ambientais (adaptado de Ferrão, 2009)

De acordo com este autor, pode-se definir dois modelos de avaliação ambiental que são caracterizados pela fase do mecanismo ambiental dos seus indicadores:

1. Abordagem orientada para o problema, baseada em indicadores intermédios, com foco nas cargas ambientais e consequências finais. Os resultados apresentados por este método têm uma elevada fiabilidade mas apresentam problemas no agrupamento em categorias de impacto

ambiental. CML 92, CML 2001, IMPACT 2002+, e TRACI são alguns exemplos destes métodos (Ferrão, 2009; Silvestre, 2012; Pargana, 2012);

2. Abordagem orientada para o dano ambiental, baseada em indicadores finais, com enfoque nas consequências ambientais. Os resultados deste método são mais difíceis de calcular e, portanto, menos fiáveis. No entanto, os seus resultados são mais fáceis de comunicar para ajudar no processo de apoio à decisão. Entre estes métodos está o EPS – *Environmental Priority Strategies* – e os associados a um Ecoindicador (Ferrão, 2009; Silvestre, 2012; Pargana, 2012).

### **3.2.4.1. Categorias de impacte ambiental**

#### **Aquecimento global**

O potencial de aquecimento global – GWP (*Global Warming Potential*) – foi desenvolvido pelo IPCC (*Intergovernmental Panel on Climate Change*) (Ferreira, 2004). Esta categoria de impacte ambiental expressa o efeito negativo sobre a saúde dos ecossistemas e a saúde humana, e está relacionado com as emissões de gases com efeito de estufa para a atmosfera, em kg equivalente de CO<sub>2</sub> (Pargana, 2012). Dos gases com efeito de estufa, destacam-se o dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), o metano (CH<sub>4</sub>) e os clorofluorcarbonetos (CFC). O cálculo deste indicador pode ser efetuado para períodos de 20, 100 ou 500 anos (Ferrão, 2009).

#### **Acidificação**

O potencial de acidificação – AP (*Acidification Potential*) – expressa a formação de ácido sulfúrico e nítrico, que pode afetar os ecossistemas naturais (impactes no solo, água e organismos biológicos). A acidificação é a redução do nível de pH da água e do solo e dá-se pela reação do dióxido de enxofre e de azoto com o vapor de água atmosférico. O potencial de acidificação é expresso em kg equivalente de SO<sub>2</sub>.

#### **Eutrofização**

O potencial de eutrofização – EP (*Eutrophication Potential*) – é o processo pelo qual um meio aquático adquire uma concentração excessiva de nutrientes, tais como fosfatos e nitratos. No meio aquático, a eutrofização pode contribuir para o aumento da quantidade de algas, diminuindo a quantidade de oxigénio na água à medida que as algas morrem, causando a morte de peixes. A eutrofização é um processo natural, mas atividades humanas (por exemplo, resíduos de adubos e fertilizantes utilizados na agricultura) podem acelerar este processo. O potencial de eutrofização é medido em kg equivalente de fosfato (PO<sub>4</sub>) (Ferrão, 2009).

#### **Depleção da camada de ozono**

A categoria de depleção da camada de ozono – ODP (*Ozone Depletion Potential*) – tem sido desenvolvida pela *World Meteorological Organisation* (WMO) (Ferreira, 2004). Esta categoria traduz o efeito que cada substância tem na redução da camada de ozono, em kg equivalente de CFC-11. A diminuição da espessura da camada de ozono leva ao aumento da quantidade de radiação ultravioleta

que atinge a superfície terrestre, levando ao aumento de doenças humanas e desequilíbrios nos ecossistemas (Ferrão, 2009).

#### **Formação de ozono fotoquímico**

O potencial fotoquímico de criação de ozono – POCP (*Photochemical Ozone Creation Potential*) – também designado por *smog* de Verão, consiste numa medida da capacidade potencial de uma substância orgânica volátil para produzir ozono e é calculado em kg equivalentes de etileno (C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>). A formação de ozono ocorre naturalmente mas também tem origem em reações fotoquímicas nas emissões automóveis e industriais (Ferrão, 2009). A formação de ozono fotoquímico tem efeitos adversos na saúde humana, nas culturas agrícolas e na vegetação natural.

#### **Depleção de recursos abióticos**

A depleção de recursos abióticos – ADP (*Abiotic Depletion Potential*) – está relacionada com a extração de minerais e combustíveis fósseis da natureza. Esta categoria é calculada para cada extração de minerais e combustíveis fósseis, em kg equivalente de antimónio/kg extraído (Pargana, 2012).

#### **3.2.4.2. Classificação**

A classificação consiste em atribuir as intervenções ambientais às categorias de impacte ambiental existentes. Por exemplo, as emissões de CO<sub>2</sub> contribuem para o efeito de estufa e o NO<sub>x</sub> e SO<sub>2</sub> contribuem para a acidificação (Ferrão, 2009). Esta fase é apenas um rearranjo do ICV, com duas exceções (Paulsen, 2001):

1. Alguns dados de entrada e saída não podem ser incluídos em nenhuma categoria de impacte ambiental escolhida. Se não for realizada uma redefinição do objetivo e do âmbito sobre a escolha das categorias de impacte ambiental, os dados são excluídos da análise;
2. Alguns dados de entrada e saída podem ser incluídos em mais do que uma categoria de impacte, sendo duplamente contabilizados. Isto é permitido, desde que as categorias não contribuam para a mesma reação de causa-efeito.

#### **3.2.4.3. Caracterização**

A caracterização diz respeito ao cálculo dos resultados do indicador e envolve a conversão dos resultados do ICV em unidades comuns, assim como a agregação dos resultados convertidos na mesma categoria de impacte (ISO 14044). Todos os parâmetros nas diferentes categorias de impacte são multiplicados por um fator de equivalência para estimar a sua categoria de impacte (Paulsen, 2001). Estes fatores são estabelecidos através da comparação do seu efeito relativamente a uma intervenção ambiental de referência (Ferrão, 2009).

#### **3.2.4.4. Elementos opcionais**

Para além dos elementos acima enunciados, podem ser adicionados outros elementos ao estudo da AICV, tais como a normalização, agregação e ponderação.



A normalização serve para demonstrar até que ponto um resultado do indicador de categoria tem um valor relativamente alto ou baixo quando comparado com um valor de referência (Goedkoop *et al*, 2013). Segundo a norma ISO 14044, a normalização é útil para “verificar inconsistências, fornecer e comunicar informações acerca do significado relativo dos resultados do indicador e preparar para procedimentos adicionais, tais como agregação, ponderação e interpretação do ciclo de vida”.

A agregação ordena e hierarquiza as categorias de impacto, e pode ser realizada através de dois procedimentos: ordenar as categorias de impacto numa base nominal (por exemplo, características tais como entradas e saídas) ou hierarquizar as categorias de impacto de acordo com um critério (por exemplo, a prioridade) (ISO 14044).

A ponderação converte e ordena os resultados do indicador em diferentes categorias de impacto ambiental utilizando fatores numéricos baseados em escolhas de valor, sem base científica (ISO 14044).

### **3.2.5. Interpretação**

A interpretação do ciclo de vida é a última etapa do processo de ACV e engloba vários elementos:

1. Identificação dos aspetos significativos: neste elemento são identificados os aspetos significativos com base nos resultados das fases de ICV e AICV com o objetivo de determinar os aspetos significativos, de acordo com a definição e objetivo do âmbito do estudo;
2. Avaliação: este elemento pretende estabelecer e melhorar a confiança nos resultados do estudo e a sua fiabilidade. Três técnicas devem ser consideradas:
  - a. Controlo de integralidade: tem como objetivo assegurar que toda a informação e dados relevantes para a interpretação estão disponíveis e completos;
  - b. Controlo de sensibilidade: serve para avaliar a fiabilidade dos resultados e conclusões;
  - c. Controlo de coerência: tem como objetivo determinar se os métodos e dados são coerentes com o âmbito e com o objetivo do estudo.
3. Conclusões, limitações e recomendações: a última etapa da interpretação tem como objetivo retirar conclusões, identificar limitações e fazer recomendações para o público-alvo do estudo.

### **3.3. Limitações da ACV**

A elaboração de um estudo de avaliação do ciclo de vida é um processo complexo, com um elevado consumo de tempo, recursos humanos e financeiros. O estudo envolve um grande volume de informação sobre os processos relacionados com a produção e a utilização do produto, sendo necessário recorrer a bases de dados e *software* específico (Ferrão, 2009). À medida que se aumenta o grau de detalhe do estudo, mais informação é necessária. No entanto, é importante ter uma avaliação criteriosa da relação custo-benefício, uma vez que o tempo e o custo necessários para adicionar mais detalhe ao estudo nem sempre se traduzem em melhorias significativas no resultado.

Um estudo da ACV não aborda os impactes económicos e sociais, nem indica qual o produto ou processo que funciona melhor ou que apresenta um custo inferior. É necessário o recurso de outras ferramentas para um apoio à decisão mais abrangente.

### **3.4. Software SimaPro**

Existem várias ferramentas disponíveis para dar apoio à ACV, tais como os *softwares SimaPro* e *GaBi*, ou o *Athena* e *LISA*, sendo estes últimos mais específicos para a área da construção e edifícios (Pinheiro, 2006). Para se escolher o *software* mais adequado para o estudo, deve-se ter em consideração três fatores (Ferrão, 2009): o primeiro está relacionado com o contributo do *software* para organizar os dados e facilitar a análise do inventário ou a avaliação do impacte. O segundo fator a ter em consideração é a capacidade do *software* para organizar os dados que caracterizam a avaliação, registando as decisões do utilizador ao longo do estudo. Por último, e devido ao facto da ACV ser utilizada como uma ferramenta de apoio à decisão, a compatibilidade com outras ferramentas informáticas constitui o terceiro fator na escolha do *software* mais adequado.

O *SimaPro*, desenvolvido por uma empresa de consultoria holandesa – *Pré Consultants* –, possui estes três fatores e, por esse motivo, vai ser utilizado na realização da presente dissertação. Esta ferramenta inclui vários métodos de AICV como o Ecoindicador 99, EDIP 1997 e 2003, EPS 2000 (Pieragostini *et al*, 2012), CML 2001 (Pargana, 2012), entre outros. O *SimaPro* permite aos utilizadores compilar e avaliar os impactes ambientais dos produtos, processos ou serviços utilizando uma abordagem do “berço ao túmulo” (*cradle-to-grave*) e possui uma vasta base de dados, incluindo dados portugueses (Pargana, 2012). Os dados coletados podem ser armazenados em projetos, mas também é possível recorrer à biblioteca do *software* que contém dados padrão fornecidos pelo *SimaPro* e por fornecedores (Goedkoop *et al*, 2013). O *software* pode ser integrado com outras ferramentas tais como, *TCAce* para avaliação do custo total (Pieragostini *et al*, 2012) e com um Sistema Integrado de Gestão Empresarial (*Enterprise Resource Planning* (ERP), em inglês) (Goedkoop *et al*, 2013).



## 4. ACV de aerogéis e de argamassas de desempenho térmico melhorado

### 4.1. Definição do objetivo e do âmbito

O objetivo final deste estudo ACV é obter um mapa comparativo do desempenho ambiental de argamassas de desempenho térmico melhorado. Para atingir este objetivo, é necessário avaliar individualmente os impactos ambientais das matérias-primas usadas nessas argamassas. Entre essas matérias-primas, estão incluídos o aerogel inorgânico, e os aerogéis HYB-A (híbrido hidrofóbico em pó) e HYB-C (híbrido hidrofóbico monolítico). A Dissertação é desenvolvida no âmbito do projeto de investigação FCT - PTDC/ECM/118262/2010: Nanorender - desempenho de argamassas de revestimento com nanoaerogéis de sílica.

#### 4.1.1. Unidade funcional

A unidade funcional tem como principal objetivo fornecer uma referência (base comum) que relacione as entradas e as saídas do sistema. Nesta dissertação, a unidade funcional considerada para os aerogéis é de 1 kg de produto acabado. A unidade funcional definida para as argamassas é de 1 m<sup>2</sup> de argamassa de 4 cm de espessura, aplicada na parede.

#### 4.1.2. Fronteiras do sistema

A fronteira do sistema tem como objetivo definir os processos unitários que vão ser incluídos neste estudo de ACV. A Figura 4.1 representa o ciclo de vida genérico do berço ao túmulo de um material de isolamento térmico.

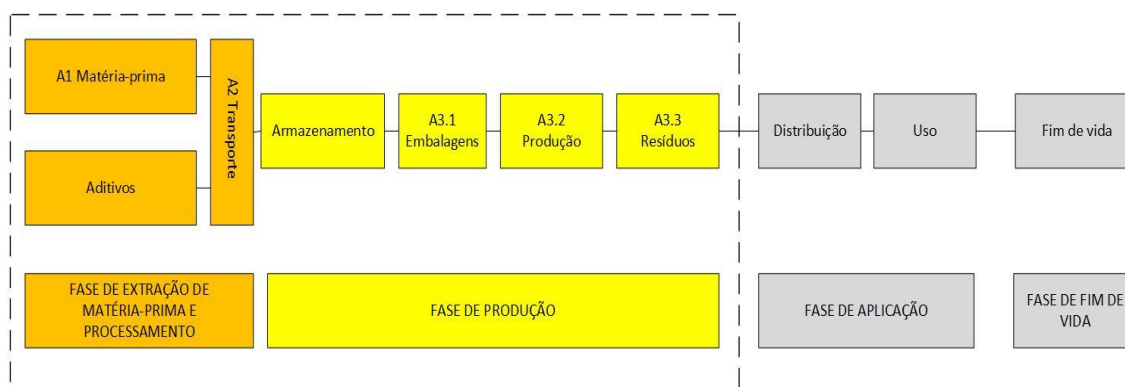


Figura 4.1. Ciclo de vida genérico dos materiais de isolamento térmico (adaptado de Pargana, 2012)

Na Dissertação, foram consideradas as fases de extração da matéria-prima e processamento (A1), transporte para o local de produção (A2) e produção e resíduos de produção e de embalagens de matérias-primas (A3). A fase de aplicação e fim-de-vida da argamassa não é considerada relevante para o estudo porque é idêntica para todas as soluções comparadas e, portanto, não será considerada. No entanto, o estudo de ACV dos três aerogéis termina no portão da fábrica e inclui todas as fases desde a

produção de matérias-primas até ao seu embalamento (fase A1-A3). A Norma Portuguesa EN 15643-2 (2013) e Silvestre (2012) classificam estas etapas de produção da seguinte forma:

- (A1) - extração de matéria-prima e processamento, processamento de entrada de material secundário;
- (A2) - transporte para o local de produção;
- (A3) - produção e resíduos de embalagens de matérias-primas
  - (A3.1) embalagem do produto;
  - (A3.2) produção;
  - (A3.3) resíduos gerados na produção, incluindo resíduos de embalagens.

#### **4.1.3. Limitações**

Foram considerados algumas simplificações e pressupostos no estudo de ACV, as quais podem influenciar os resultados finais do estudo:

- na fase de inventários, os dados sobre a quantidade de matérias-primas, embalagens e resíduos de produção e de embalagens foram obtidos através de questionários respondidos pela responsável da produção dos aerogéis no Centro de Química-Física Molecular do Instituto Superior Técnico (IST); no entanto, os dados relativos à extração e produção de matérias-primas, ao seu transporte para o IST e à produção de energia elétrica foram obtidos com recurso a bases de dados existentes no *software* SimaPro (e.g. Ecoinvent);
- a avaliação do impacte ambiental é expressa em apenas seis categorias de impacte ambiental e dois indicadores ambientais;
- o estudo é limitado às fronteiras do sistema;
- o estudo refere-se a uma produção à escala laboratorial;
- em relação à modelação da produção dos três aerogéis: todas as fases de fabrico foram agrupadas em apenas duas - “mistura” e “secagem”, por tal não influenciar os resultados finais e simplificar o processo de modelação no *software* SimaPro; os consumíveis (recipiente utilizado para a síntese do aerogel) não foram considerados, uma vez que são reutilizados; os processos de “moagem” e “ensacamento” não foram considerados relevantes para o estudo porque são realizados manualmente e não apresentam impactes ambientais; a energia gasta pela balança para o doseamento foi considerada desprezável.

## **4.2. Avaliação do inventário do ciclo de vida dos aerogéis**

### **4.2.1. Síntese dos aerogéis**

#### **Aerogel inorgânico**

O aerogel inorgânico é produzido no Instituto Superior Técnico (IST), em Lisboa. A síntese deste aerogel inicia-se com a mistura do precursor de sílica tetraetóxido de silício (TEOS) com o co-solvente, iso-propanol (i-PrOH). A esta mistura vai sendo adicionada água com agitação vigorosa. A adição de ácido clorídrico vai acidificar a mistura, que posteriormente vai ser fechada dentro de uma incubadora. A agitação é interrompida e o sol é neutralizado por adição de hidróxido de amónia. O sol

permanece dentro da incubadora a uma temperatura constante até gelificar. Ao alcogel é adicionada uma solução de envelhecimento constituída por TEOS, H<sub>2</sub>O e i-PrOH para envelhecer a rede de sílica. Após permanecer durante 24 horas na incubadora, o gel é lavado e seco à pressão atmosférica, a uma temperatura constante em atmosfera saturada de solvente. Após a secagem, é obtido um aerogel translúcido de dimensões variáveis. O aerogel é reduzido a partículas recorrendo à moagem manual num almofariz de cerâmica e peneirado em peneiros (Júlio *et al*, 2013). A Figura 4.2 representa, em detalhe, o processo de produção do aerogel inorgânico.

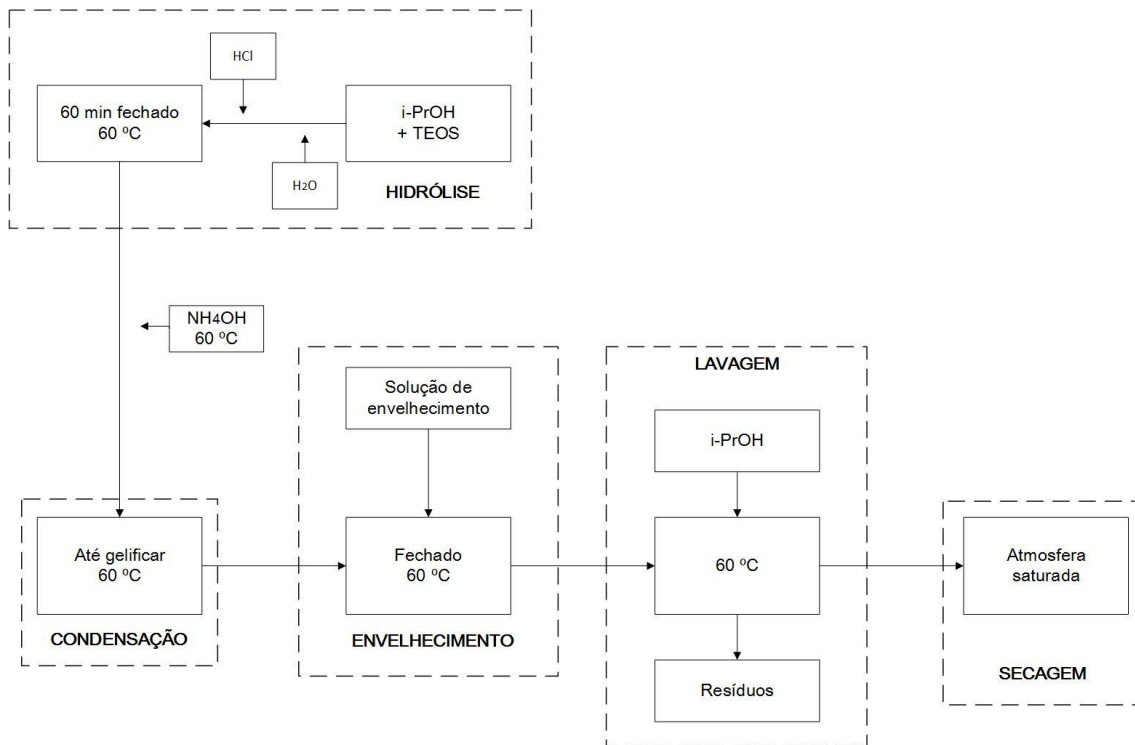


Figura 4.2. Representação esquemática do processo de preparação dos aerogéis de sílica inorgânicos

O aerogel inorgânico é relativamente hidrofílico o que faz com que este possa condensar e, conseqüentemente, deteriorar-se ao longo do tempo quando exposto a ambientes húmidos. Como o objetivo destes aerogéis é serem utilizados como agregados nas argamassas, a hidrofobicidade é um dos requisitos mais importantes para a utilização dos mesmos a longo prazo. Esta propriedade pode ser alcançada modificando a composição química da superfície dos poros e pode ser realizado durante ou após o processo de síntese (Júlio *et al*, 2014). O aerogel HYB-C e HYB-A, apresentados seguidamente, são resultado de uma otimização do aerogel inorgânico.

### Aerogel híbrido monolítico (HYB-C)

A síntese do aerogel HYB-C é semelhante à do aerogel inorgânico (Figura 4.3). Deste modo, as duas primeiras fases (hidrólise e condensação) do aerogel HYB-C são iguais ao aerogel inorgânico. Na fase de envelhecimento, o gel é introduzido num banho de HMDZ e i-PrOH com um teor de HMDZ que permita a modificação superficial dos poros. Por fim, o aerogel é colocado e fechado numa incubadora para secar.

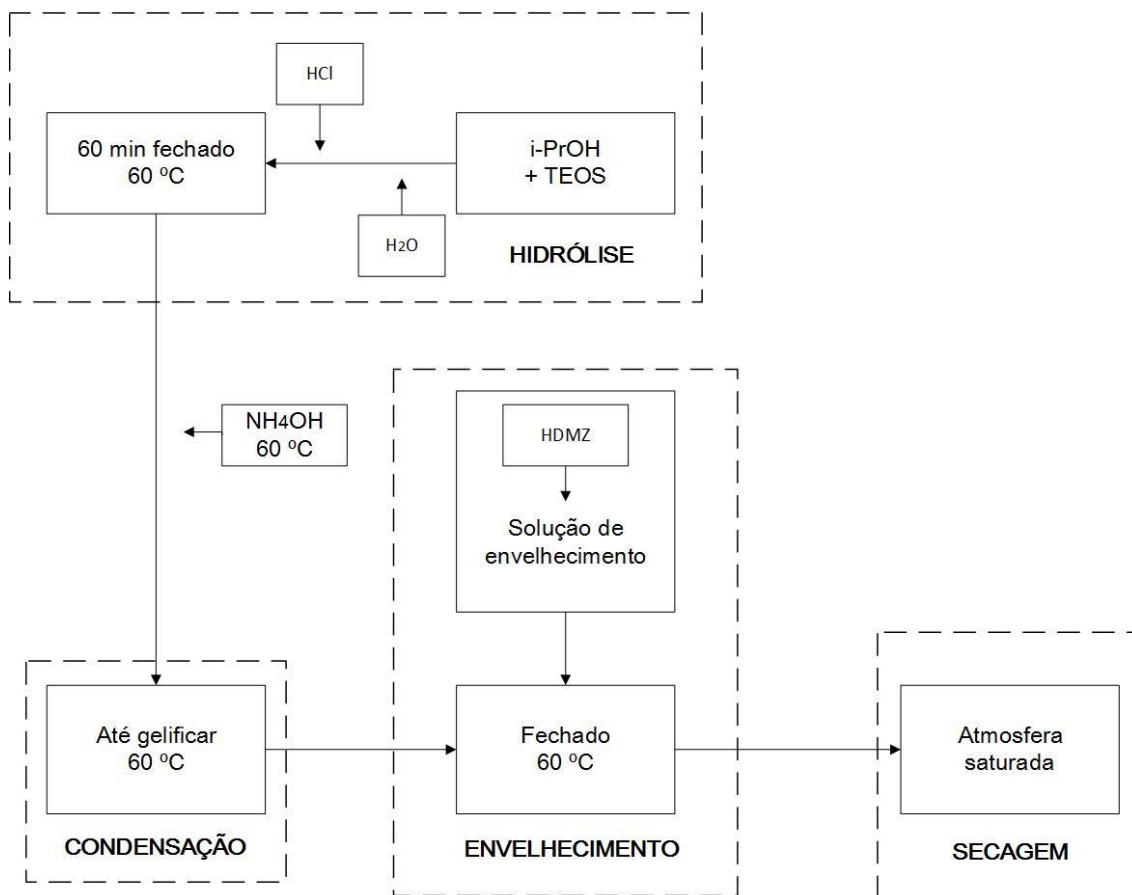


Figura 4.3. Representação esquemática do processo de preparação de aerogéis híbridos monolíticos (HYB-C)

### Aerogel híbrido em pó (HYB-A)

A necessidade de passar de uma escala de produção de gramas para quilogramas de aerogel levou à otimização da sua síntese. Uma vez que a secagem é a fase mais demorada do processo, foi testada uma nova abordagem nas matérias-primas. Neste processo, o TEOS foi substituído pelo silicato de sódio (D40 da *Solvey Portugal*). O silicato de sódio é um subproduto da indústria de carbonato de sódio e, por isso, tem um custo de aquisição reduzido. A hidrofobicidade (característica importante para futura incorporação nas argamassas) é conseguida por sililação, utilizando Hexametildissilazano (HMDZ) como co-percursor orgânico para modificação superficial. Seguidamente, é adicionado ácido nítrico (HNO<sub>3</sub>) e HMDZ à solução de silicato de sódio, sob agitação constante. A fase de gelificação ocorre à temperatura ambiente e é seguida de uma etapa de troca de solvente, imergindo o gel em *n*-hexano. O aerogel é seco à pressão atmosférica a 60 °C numa primeira fase e 100 °C na fase seguinte. O aerogel, que é obtido em

pó, é lavado para remover iões de nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ). Por fim, é novamente seco na incubadora à pressão atmosférica em dois estágios, de 60 °C e 100 °C (Júlio *et al*, 2013). A Figura 4.4 representa a síntese deste aerogel.

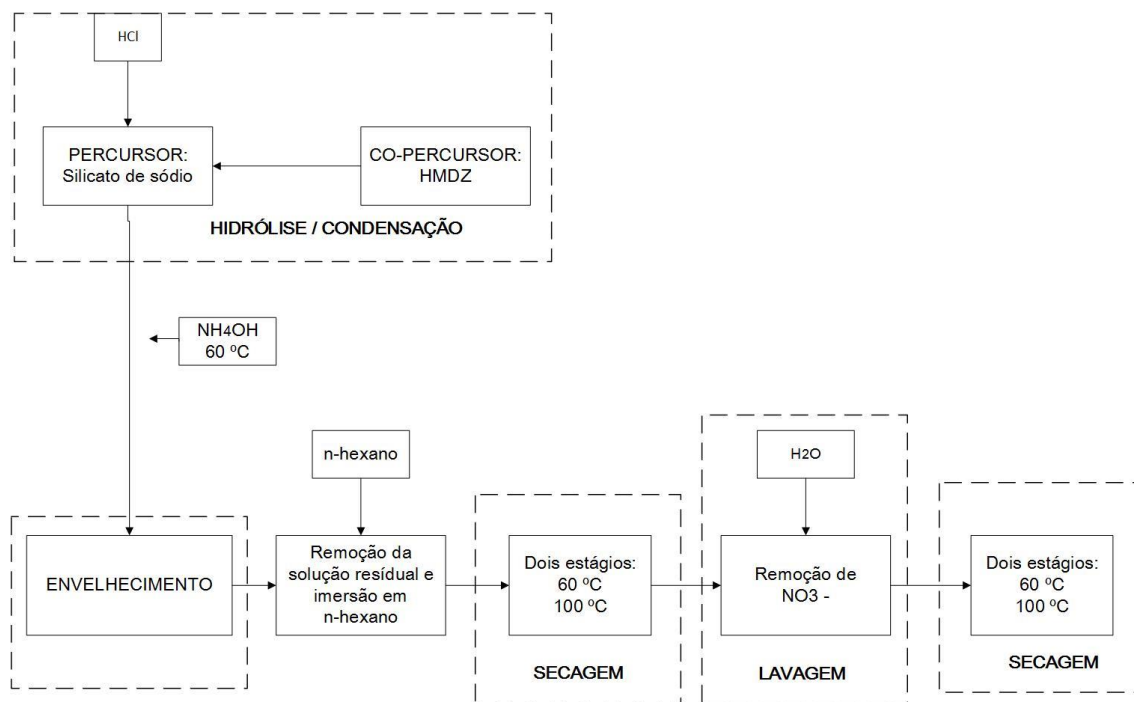


Figura 4.4. Representação esquemática do processo de preparação dos aerogéis híbridos em pó

#### 4.2.2. Avaliação dos inventários do ciclo de vida

Como referido em 4.1.3, a modelação de cada fase do processo de fabrico no *SimaPro* foi simplificada e não se representou todos os processos individuais mencionados na secção 4.2.1. Nesta simplificação, os dois primeiros processos da fase de produção - a mistura e o aquecimento e agitação, foram agrupados na fase “mistura e agitação” para o aerogel inorgânico (AI) e para o aerogel HYB-C. Os restantes processos, repouso e gelificação, envelhecimento, lavagem (no caso do aerogel inorgânico) e secagem, foram agrupadas na fase “secagem”. No aerogel HYB-A, a primeira fase diz respeito à “mistura, condensação e envelhecimento”. As duas fases de secagem e a lavagem do aerogel foram agrupadas na fase “secagem”. O último processo nos três aerogéis diz respeito ao “ensacamento”. Estas simplificações foram possíveis uma vez que o aerogel permanece na incubadora durante todas as fases do processo, sendo apenas necessário adicionar as matérias-primas e energia ao longo da síntese. De modo a otimizar o processo de secagem foi utilizada a estufa do Laboratório de Construção do DECivil do IST para o aerogel inorgânico e o HYB-C.

#### Extração das matérias-primas

As matérias-primas necessárias à produção dos três aerogéis foram modeladas a partir das bases de dados existentes no *SimaPro*. Contudo, foi necessário recorrer a um processo semelhante quando os mais ajustados não se encontravam disponíveis nestas bases de dados, como é o caso do



tetraetóxido de silício e do hidróxido de amónia. Na Tabela 4.1 estão descritas as matérias-primas utilizadas em cada aerogel e o processo correspondente usado na sua modelação no *SimaPro*.

Tabela 4.1. Matérias-primas necessárias para a produção das três versões do aerogel

Matéria-prima			Aerogel		
Designação		Processo utilizado no <i>SimaPro</i>	Inorgânico	HYB-C	HYB-A
TEOS	Tetraetóxido de silício	<i>Tetrachlorosilane</i> [Ecoinvent]	X	X	
i-PrOH	Iso-propanol	<i>Isopropanol</i> [Ecoinvent]	X	X	
HCl	Ácido clorídrico	<i>Hydrochloric acid</i> [Ecoinvent]	X	X	
NH <sub>4</sub> OH	Hidróxido de amónia	<i>Ammonia, liquid</i> [Ecoinvent]	X	X	
HMDZ	Hexametildisilazano	<i>Hexamethyldisilazane</i> [Ecoinvent]		X	X
Silicato de sódio	Silicato de sódio	<i>Sodium silicate</i> [Ecoinvent]			X
HNO <sub>3</sub>	Ácido nítrico	<i>Nitric acid</i> [Ecoinvent]			X
n-hexano	Hexano	<i>Hexane</i> [Ecoinvent]			X
H <sub>2</sub> O	Água destilada	<i>Water, ultrapure</i> [Ecoinvent]	X	X	

### Transporte das matérias-primas

À exceção da água, todas as matérias-primas necessárias para a síntese dos aerogéis são compradas a uma empresa localizada em Loures (Tabela 4.2). O transporte é realizado com recurso a uma carrinha e foi considerado que a distância entre esta empresa e o IST é de 17 km. De forma semelhante à extração das matérias-primas, a modelação do transporte foi realizada com o recurso à base de dados ELCD existente no *SimaPro*.

O transporte das matérias-primas da carrinha para o local de produção, assim como a movimentação dentro do laboratório não foram consideradas uma vez que, por se tratar de quantidades muito reduzidas, o transporte é realizado manualmente.

Tabela 4.2. Origem e forma de transporte das matérias-primas necessárias para a produção das três versões de aerogel

Matéria-prima	Origem	Transporte
TEOS	Loures - 17 km	Carrinha
i-PrOH		
HCl		
NH <sub>4</sub> OH		
HMDZ		
Silicato de sódio		
HNO <sub>3</sub>		
n-hexano		
H <sub>2</sub> O	Laboratório	-

### Produção do aerogel

A fase de produção dos aerogéis está dividida em três etapas: (1) agitação e mistura; (2) secagem e (3) ensacamento.

1. **Agitação e mistura:** esta etapa corresponde à agitação e mistura das matérias-primas. O processo ocorre dentro de uma incubadora no Centro de Química-Física Molecular do IST;
2. **Secagem:** nesta etapa, para se otimizar este processo, foi utilizada a estufa do Laboratório de Construção do DECivil do IST para a secagem do aerogel inorgânico e do HYB-C;
3. **Ensacamento:** nesta última fase, o aerogel proveniente da fase anterior é embalado em sacos de plástico. Cada saco de plástico permite embalar 150 g de aerogel. Deste modo, para embalar 1 kg de aerogel produzido, são necessários sete sacos de plástico.

Nos Anexos confidenciais 4.I, 4.II e 4.III, estão descritas as quantidades de matéria-prima e de energia utilizadas para cada uma das fases de produção do aerogel inorgânico, HYB-C e HYB-A, respetivamente.

Ao longo do processo produtivo dos três aerogéis, são produzidos resíduos provenientes das embalagens de matérias-primas, das embalagens do produto final, assim como resíduos químicos. As Tabelas 4.3, 4.4 e 4.5 apresentam os diferentes tipos de resíduos e as respetivas quantidades por kg de produto acabado.

### 4.3. Avaliação ambiental do ciclo de vida dos aerogéis

Nesta secção, realiza-se a análise quantitativa dos impactes ambientais das etapas de produção A1 a A3. Os resultados da ACV são apresentados, comparados e discutidos para os três aerogéis. Os dados recolhidos através de questionários junto do produtor foram inseridos no *software SimaPro* e foi realizada uma análise para as seis categorias de impacte ambiental previamente selecionadas. Estas categorias foram determinadas através do método de avaliação de impacte CML 2001. A Tabela 4.6 apresenta os indicadores de impacte considerados para cada uma das seis categorias de impacte ambiental. Foram igualmente utilizadas outras categorias de impacte tais como

o PE-NRe e PE-Re (Energia Primária Não Renovável, e Renovável, respetivamente), que foram calculadas através do método de avaliação *Cumulative Energy Demand* (CED).

Tabela 4.3. Resíduos de embalagens de matéria-prima para as três versões de aerogel

Resíduos de embalagens de matéria-prima				
Matéria-prima	Embalagem	Quantidade (kg)		
		Inorgânico	HYB-C	HYB-A
TEOS	Vidro para reciclagem	1,50	1,50	-
i-PrOH	Polietileno de alta densidade	1,10	1,10	-
HCl	Polietileno de alta densidade	0,016	0,016	-
NH <sub>4</sub> OH	Polietileno de alta densidade	0,20	0,20	-
HMDZ	Vidro para reciclagem	-	0,26	0,39
HNO <sub>3</sub>	Polietileno de alta densidade	-	-	0,035
n-hexano	Vidro para reciclagem	-	-	1,30
Silicato de sódio	Polietileno de alta densidade	-	-	0,50

Tabela 4.4. Resíduos de embalagens do produto final para as três versões de aerogel

Resíduos embalagens do produto final		
Produto	Embalagem	Quantidade (g)
Embalagem de cartão	Cartão	2,85
Sacos de plástico	Polietileno de baixa densidade	0,14

Tabela 4.5. Resíduos químicos resultantes da produção do aerogel inorgânico, do HYB-A e HYB-C

Resíduos químicos		
Aerogel inorgânico		
Resíduos	Quantidade	Fase
i-PrOH	3,303 kg	Secagem
Aerogel HYB-A		
Resíduos	Quantidade	Fase
NH <sub>3</sub> (g)	120 g	Mistura
NO <sub>3</sub>	0,6 kg	Secagem
Aerogel HYB-A		
Resíduos	Quantidade	Fase
NH <sub>3</sub> (g)	78 g	Secagem

Tabela 4.6. Categorias de impacto ambiental selecionadas e respetivo indicador

<b>Categoria de impacto ambiental</b>	<b>Indicador</b>
Potencial de depleção de recursos abióticos	<i>ADP - Abiotic depletion potential</i> [kg Sb eq]
Potencial de acidificação	<i>AP - Acidification potential</i> [kg SO <sub>2</sub> eq]
Potencial de eutrofização	<i>EP - Eutrophication potential</i> [kg PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> eq]
Potencial de aquecimento global	<i>GWP - Global warming potential</i> [kg CO <sub>2</sub> eq]
Potencial de depleção da camada de ozono	<i>ODP - Ozone depletion potential</i> [kg CFC-11 eq]
Potencial de formação fotoquímica de ozono	<i>POCP - Photochemical ozone creation potential</i> [kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> eq]

#### 4.3.1. Aerogel inorgânico

Nesta secção, são apresentados os resultados da ACV do berço ao portão (do laboratório) para a produção do aerogel inorgânico. Na Tabela 4.7, encontram-se os resultados, para cada categoria de impacto ambiental, das fases (A1-A3) e, na Tabela 4.8, esses resultados são apresentados em percentagem. A Figura 4.5 mostra a contribuição relativa, em percentagem, destas fases para cada uma das categorias de impacto ambiental selecionadas.

Tabela 4.7. Resultados da ACV para as fases (A1-A3) para o aerogel inorgânico

Indicador	Unidade	Fases do ciclo de vida (para 1 kg de produto acabado)					
		A1-A3	A1	A2	A3.1	A3.2	A3.3
PE-NRe	MJ	7,86E+03	6,78E+03	2,08E+02	1,02E-02	6,64E+02	2,06E+02
PE-Re	MJ	1,16E+03	9,93E+02	1,08E+00	1,63E-04	1,67E+02	1,51E+00
ADP	kg Sb eq	3,83E+00	3,26E+00	9,00E-02	4,80E-06	3,88E-01	9,24E-02
AP	kg SO <sub>2</sub> eq	1,36E+00	7,57E-01	2,60E-02	1,12E-06	5,51E-01	2,59E-02
EP	kg PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> eq	3,25E-01	2,13E-01	1,40E-02	7,02E-08	8,40E-02	1,40E-02
GWP	kg CO <sub>2</sub> eq	4,54E+02	3,84E+02	6,00E+00	2,89E-04	5,78E+01	6,17E+00
ODP	kg CFC-11 eq	5,01E-05	4,60E-05	3,00E-07	0,00E+00	3,56E-06	2,40E-07
POCP	kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	1,16E-01	8,75E-02	6,80E-03	5,81E-08	1,50E-02	6,74E-03

Tabela 4.8. Resultados (%) da AVC para as fases (A1-A3) para o aerogel inorgânico

Indicador	Unidade	Fases do ciclo de vida (para 1 kg de produto acabado)					
		A1-A3	A1	A2	A3.1	A3.2	A3.3
PE-NRe	MJ	100,00%	86,28%	2,65%	0,00%	8,45%	2,63%
PE-Re	MJ	100,00%	85,38%	0,09%	0,00%	14,39%	0,13%
ADP	kg Sb eq	100,00%	85,12%	2,35%	0,00%	10,12%	2,41%
AP	kg SO <sub>2</sub> eq	100,00%	55,66%	1,91%	0,00%	40,52%	1,90%
EP	kg PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> eq	100,00%	65,54%	4,31%	0,00%	25,85%	4,31%
GWP	kg CO <sub>2</sub> eq	100,00%	84,58%	1,32%	0,00%	12,74%	1,36%
ODP	kg CFC-11 eq	100,00%	91,82%	0,60%	0,00%	7,11%	0,48%
POCP	kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> eq	100,00%	75,43%	5,86%	0,00%	12,90%	5,81%

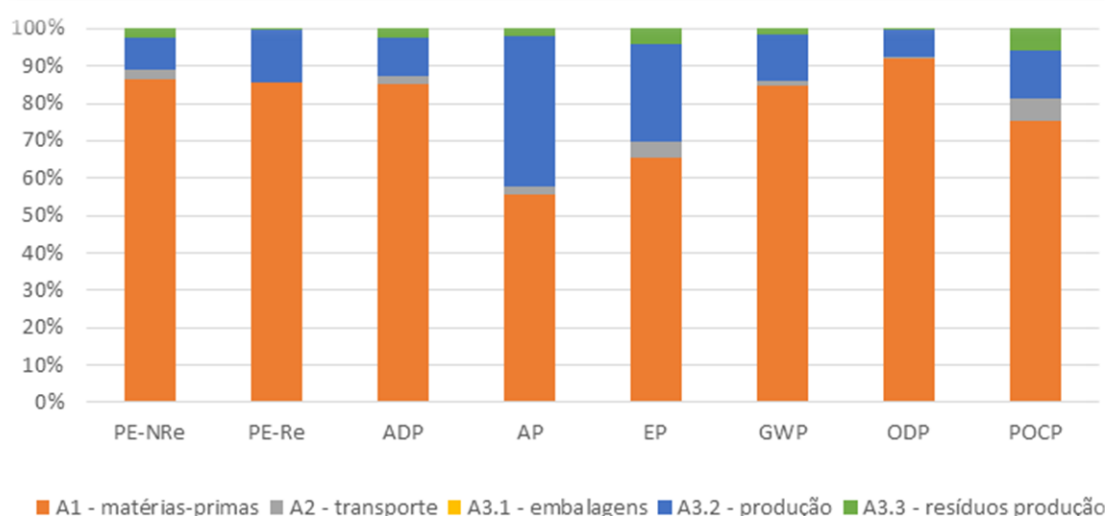


Figura 4.5. Contribuição relativa das fases (A1-A3) para cada indicador de categoria de impacto ambiental (aerogel inorgânico)

A fase (A1) tem uma contribuição superior a 70% em todas as categorias de impacto ambiental (exceto para acidificação (AP) e eutrofização (EP), com 56% e 67%, respectivamente). A fase de produção (A3.2) contribui com cerca de 40% para a categoria AP e 26% para a categoria EP. A quantidade de embalagens utilizadas no produto final (A3.1) é muito reduzida e por isso praticamente não contribui para os impactos deste processo.

#### 4.3.2. Aerogel híbrido em pó (HYB-A)

Os resultados da ACV do berço ao portão da fábrica para o aerogel HYB-A são apresentados nesta secção. A Tabela 4.9 mostra a contribuição das fases (A1-A3) para as categorias de impacte ambiental seleccionadas e a Tabela 4.10 mostra essa contribuição em percentagem. A contribuição relativa destas fases está representada em percentagem na Figura 4.6, para essas mesmas categorias de impacte ambiental.

Tabela 4.9. Resultados da ACV para as fases (A1-A3) para o aerogel HYB-A

Indicador	Unidade	Fases do ciclo de vida (para 1 kg de produto acabado)					
		A1-A3	A1	A2	A3.1	A3.2	A3.3
PE-NRe	MJ	1,15E+03	5,83E+02	3,22E+02	1,63E-03	2,39E+02	8,01E+00
PE-Re	MJ	5,74E+01	1,20E+01	4,34E-01	1,63E-04	4,48E+01	1,19E-01
ADP	kg Sb eq	5,47E-01	2,60E-01	1,58E-01	4,80E-06	1,25E-01	3,70E-03
AP	kg SO <sub>2</sub> eq	5,51E-01	9,85E-02	1,06E-01	1,12E-06	3,42E-01	5,25E-03
EP	kg PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> eq	1,17E-01	2,50E-02	2,40E-02	7,02E-08	6,67E-02	1,30E-03
GWP	kg CO <sub>2</sub> eq	5,60E+01	1,73E+01	2,29E+01	2,89E-04	1,39E+01	1,92E+00
ODP	kg CFC-11 eq	7,08E-06	6,04E-06	5,00E-08	0,00E+00	9,33E-07	5,67E-08
POCP	kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> eq	2,65E-02	1,80E-02	2,60E-03	5,81E-08	5,83E-03	7,38E-05

Tabela 4.10. Resultados (%) da ACV para as fases (A1-A3) para o aerogel HYB-A

Indicador	Unidade	Fases do ciclo de vida (para 1 kg de produto acabado)					
		A1-A3	A1	A2	A3.1	A3.2	A3.3
PE-NRe	MJ	100%	51%	28%	0%	21%	1%
PE-Re	MJ	100%	21%	1%	0%	78%	0%
ADP	kg Sb eq	100,00%	47,53%	28,88%	0,00%	22,91%	0,68%
AP	kg SO <sub>2</sub> eq	100,00%	17,88%	19,15%	0,00%	62,02%	0,95%
EP	kg PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> eq	100,00%	21,37%	20,51%	0,00%	57,01%	1,11%
GWP	kg CO <sub>2</sub> eq	100,00%	30,89%	40,89%	0,00%	24,79%	3,43%
ODP	kg CFC-11 eq	100,00%	85,31%	0,71%	0,00%	13,18%	0,80%
POCP	kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> eq	100,00%	67,92%	9,81%	0,00%	21,99%	0,28%

A extração e produção das matérias-primas (A1) contribuem com o maior impacte para as categorias PE-NRe, POCP e ODP (51%, 67,92% e 85,31%, respetivamente). Para o potencial de AP e EP, a contribuição desta fase é reduzida (17,88% e 21,37%, respetivamente).

O transporte tem um maior impacte no aquecimento global (GWP, 41%), na depleção de recursos abióticos (ADP, 29%) e no consumo de recursos energéticos não renováveis (PE-NRe, 28%). Estes impactes devem-se à extração de combustíveis fósseis que são usados como combustível e também pelas emissões de gases com efeitos de estufa para a atmosfera.

A fase correspondente à produção (A3.2) tem um impacte de 78% no consumo de recursos renováveis, 62% na acidificação (AP) e 57% na eutrofização (EP). O consumo de recursos energéticos

não renováveis é, aproximadamente, cinco vezes superior em percentagem ao consumo de recursos energéticos renováveis.

Tal como no aerogel inorgânico, o impacto das embalagens utilizadas no produto final (A3.1) é reduzido e, por isso, o seu contributo para os impactos ambientais não é significativo.

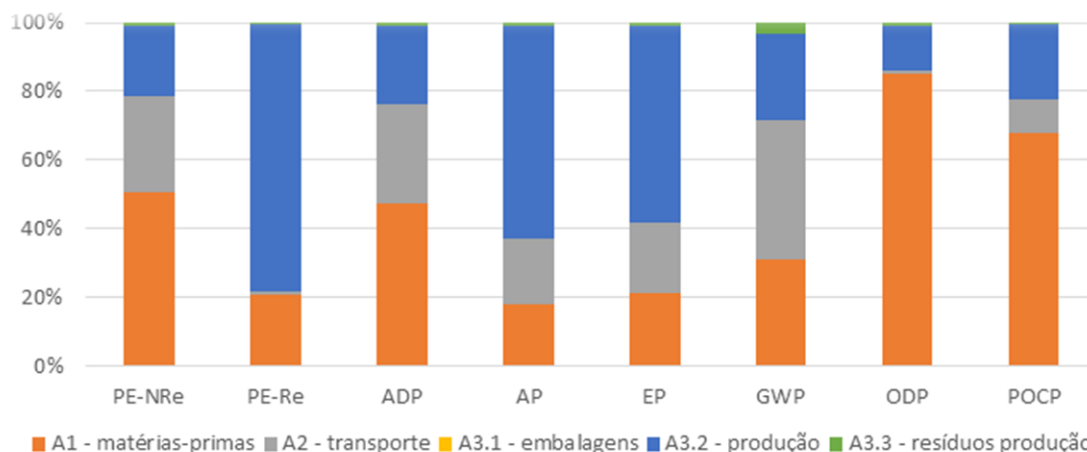


Figura 4.6. Contribuição relativa das fases (A1-A3) para cada indicador de categoria de impacto ambiental (aerogel HYB-A)

#### 4.3.3. Aerogel híbrido monolítico (HYB-C)

Nesta secção, são apresentados os resultados da ACV do berço ao portão para o aerogel HYB-C. Na Tabela 4.11, estão identificadas as contribuições, para cada categoria de impacto ambiental, das fases (A1-A3). A contribuição relativa destas fases está apresentada, em percentagem, na Figura 4.7 e na Tabela 4.12.

Para cada indicador de categoria, a fase (A1) apresenta valores quase sempre acima de 80% (com exceção do AP e EP, com valores de 52 e 62%, respetivamente). A produção do aerogel (A3.2) tem um impacto ambiental mais significativo nas categorias AP e EP, com valores de 48% e 38%, respetivamente. As fases A2, A3.1 e A3.3 apresentam valores pouco significativos.

Verifica-se que é a produção da matéria-prima TEOS que mais contribui para os indicadores AP e GWP.

Para as categorias de EP e POCP, é a produção de TEOS e de i-PrOH que apresenta um impacto ambiental mais significativo.

Tabela 4.11. Resultados da ACV para as fases (A1-A3) para o aerogel HYB-C

Indicador	Unidade	Fases do ciclo de vida (para 1 kg de produto acabado)					
		A1-A3	A1	A2	A3.1	A3.2	A3.3
PE-NRe	MJ	7,42E+03	6,62E+03	0,00E+00	1,02E-02	8,00E+02	-6,84E-04
PE-Re	MJ	1,15E+03	9,96E+02	0,00E+00	1,63E-04	1,58E+02	-3,93E-06
ADP	kg Sb eq	3,66E+00	3,19E+00	0,00E+00	4,80E-06	4,70E-01	-2,83E-07
AP	kg SO <sub>2</sub> eq	1,43E+00	7,41E-01	0,00E+00	1,12E-06	6,89E-01	-2,95E-08
EP	kg PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> eq	3,29E-01	2,03E-01	0,00E+00	7,02E-08	1,26E-01	2,00E-08
GWP	kg CO <sub>2</sub> eq	4,42E+02	3,80E+02	0,00E+00	2,89E-04	6,20E+01	2,27E-05
ODP	kg CFC-11 eq	5,08E-05	4,72E-05	0,00E+00	0,00E+00	3,60E-06	-1,16E-12
POCP	kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> eq	1,02E-01	8,14E-02	1,00E-04	5,81E-08	2,05E-02	-1,76E-09

Tabela 4.12. Resultados (%) da ACV para as fases (A1-A3) para o aerogel HYB-C

Indicador	Unidade	Fases do ciclo de vida (para 1 kg de produto acabado)					
		A1-A3	A1	A2	A3.1	A3.2	A3.3
PE-NRe	MJ	100%	89%	0%	0%	11%	0%
PE-Re	MJ	100%	86%	0%	0%	14%	0%
ADP	kg Sb eq	100,00%	87,16%	0,00%	0,00%	12,84%	0,00%
AP	kg SO <sub>2</sub> eq	100,00%	51,82%	0,00%	0,00%	48,18%	0,00%
EP	kg PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> eq	100,00%	61,70%	0,00%	0,00%	38,30%	0,00%
GWP	kg CO <sub>2</sub> eq	100,00%	85,97%	0,00%	0,00%	14,03%	0,00%
ODP	kg CFC-11 eq	100,00%	92,91%	0,00%	0,00%	7,09%	0,00%
POCP	kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> eq	100,00%	79,80%	0,10%	0,00%	20,10%	0,00%



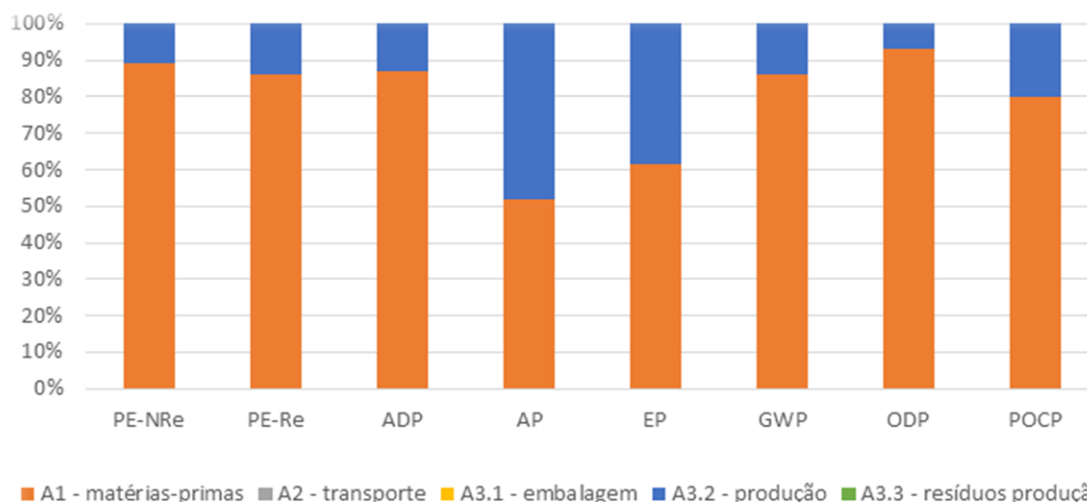


Figura 4.7. Contribuição relativa das fases (A1-A3) para cada indicador de categoria de impacto ambiental (aerogel HYB-C)

#### 4.3.4. Comparação da avaliação ambiental do ciclo de vida dos aerogéis

As Tabelas 4.13, 4.14 e 4.15 apresentam a comparação entre o impacto por kg da produção de cada um dos três aerogéis para as fases que mais contribuem para o impacto total em cada uma das categorias de impacto ambiental.

Tabela 4.13. Comparação dos impactos ambientais das fases A1-A3 para o AI, HYB-A e HYB-C (por kg de produto acabado)

Indicador	Unidade	A1-A3		
		Inorgânico	HYB-A	HYB-C
PE-NRe	MJ	7,86E+03	1,15E+03	7,42E+03
PE-Re	MJ	1,16E+03	5,74E+01	1,15E+03
ADP	kg Sb eq	3,83E+00	5,47E-01	3,66E+00
AP	kg SO <sub>2</sub> eq	1,36E+00	5,51E-01	1,43E+00
EP	kg PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> eq	3,25E-01	1,17E-01	3,29E-01
GWP	kg CO <sub>2</sub> eq	4,54E+02	5,60E+01	4,42E+02
ODP	kg CFC-11 eq	5,01E-05	7,08E-06	5,08E-05
POCP	kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> eq	1,16E-01	2,65E-02	1,02E-01

Verifica-se que o aerogel HYB-A apresenta o menor impacto ambiental em todas as categorias de impacto. Para a fase A1-A3, o aerogel inorgânico apresenta o maior impacto ambiental nos indicadores ADP, GWP, POCP, PE-NRe e PE-Re, enquanto o HYB-C tem o maior impacto nos restantes indicadores. Esta diferença deve-se às matérias-primas utilizadas para a síntese de cada aerogel. O aerogel inorgânico e o HYB-C têm uma composição que não é semelhante mas, como utilizam o mesmo precursor de sílica (TEOS), apresentam impactos idênticos. O HYB-A não tem TEOS na sua composição, a matéria-prima responsável pela maioria dos impactos ambientais, o que justifica o melhor desempenho deste aerogel. Assim, na fase A1 é o aerogel inorgânico que causa um maior

impacte ambiental, seguindo-se o HYB-C e, por fim, o HYB-A. Na fase de produção, A3.2, é o aerogel HYB-C que possui um maior impacte ambiental, seguido do inorgânico e do HYB-A. O aerogel HYB-A necessita de menos tempo de secagem, gastando menos energia o que faz com que os impactes sejam menores.

Dowson *et al* (2012) produziram duas versões de um aerogel à base de sílica recorrendo à secagem supercrítica, a alta e a baixa temperatura (HTSCD e LTSCD, respetivamente). Neste estudo, efetuaram uma ACV do berço ao portão da fábrica e quantificaram a energia consumida e a quantidade de CO<sub>2</sub> resultante desse consumo durante a produção deste aerogel. Na Tabela 4.16, encontra-se a informação relativa aos impactes ambientais da categoria GWP para os três aerogéis produzidos no laboratório do CQFM do IST e para estas alternativas de produção de aerogel. Houve necessidade de se arbitrar valores para a densidade do aerogel (a partir das densidades mínimas e máximas correntes deste material), uma vez que no artigo referido não está especificado nenhum valor para este parâmetro.

Tabela 4.14. Comparação dos impactes ambientais da fase A1 para o AI, HYB-A e HYB-C (por kg de produto acabado)

Indicador	Unidade	A1		
		Inorgânico	HYB-A	HYB-C
PE-NRe	MJ	6,78E+03	5,83E+02	6,62E+03
PE-Re	MJ	9,93E+02	1,20E+01	9,96E+02
ADP	kg Sb eq	3,26E+00	2,60E-01	3,19E+00
AP	kg SO <sub>2</sub> eq	7,57E-01	9,85E-02	7,41E-01
EP	kg PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> eq	2,13E-01	2,50E-02	2,03E-01
GWP	kg CO <sub>2</sub> eq	3,84E+02	1,73E+01	3,80E+02
ODP	kg CFC-11 eq	4,60E-05	6,04E-06	4,72E-05
POCP	kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> eq	8,75E-02	1,80E-02	8,14E-02

Tabela 4.15. Comparação dos impactes ambientais da fase A3.2 para o AI, HYB-A e HYB-C (por kg de produto acabado)

Indicador	Unidade	A3.2		
		Inorgânico	HYB-A	HYB-C
PE-NRe	MJ	6,64E+02	2,39E+02	8,00E+02
PE-Re	MJ	1,67E+02	4,48E+01	1,58E+02
ADP	kg Sb eq	3,88E-01	1,25E-01	4,70E-01
AP	kg SO <sub>2</sub> eq	5,51E-01	3,42E-01	6,89E-01
EP	kg PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> eq	8,40E-02	6,67E-02	1,26E-01
GWP	kg CO <sub>2</sub> eq	5,78E+01	1,39E+01	6,20E+01
ODP	kg CFC-11 eq	3,56E-06	9,33E-07	3,60E-06
POCP	kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	1,50E-02	5,83E-03	2,05E-02

Tabela 4.16. Comparação dos impactes ambientais dos aerogéis produzidos no IST e dos aerogéis produzidos por Dowson *et al* para a categoria de impacte GWP

GWP [kg CO <sub>2</sub> eq]					
Laboratório IST			Dowson <i>et al</i> (2012)		
Aerogel inorgânico	HYB-A	HYB-C	HTSCD	LTSCD	Densidade (kg/m <sup>3</sup> )
454	56	442	97,14	1007,14	175
			55,74	577,87	305

Na Figura 4.8, é representada a categoria GWP para estes aerogéis.

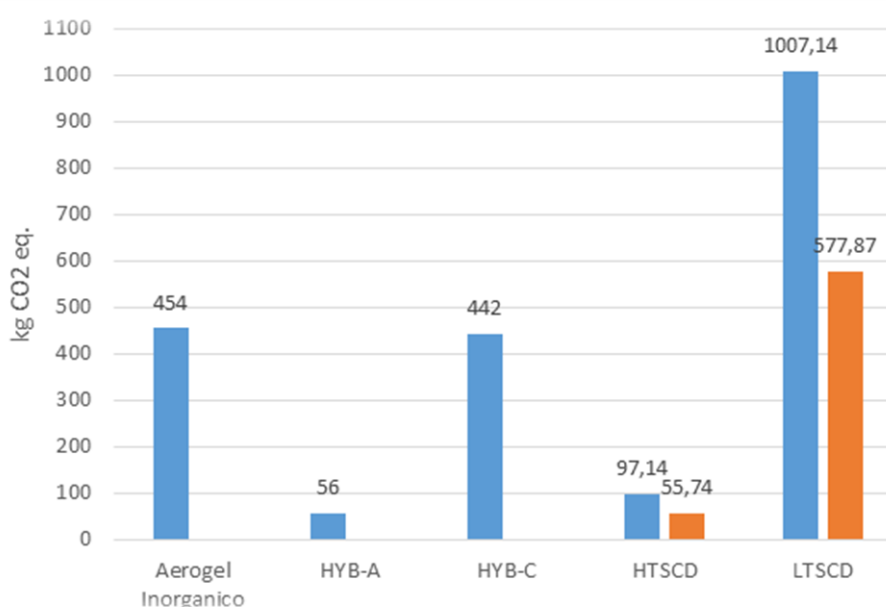


Figura 4.8. Representação gráfica dos impactes ambientais dos aerogéis produzidos no IST e dos aerogéis produzidos por Dowson *et al* para a categoria de impacte GWP (densidades arbitradas para estes últimos: 175 kg/m<sup>3</sup> e 305 kg/m<sup>3</sup>, a azul e a laranja, respetivamente)

Verifica-se que o aerogel produzido recorrendo à secagem supercrítica a baixa temperatura (LTSCD) apresenta um valor superior aos restantes aerogéis para os dois valores de densidade atribuídos. No entanto, o aerogel recorrendo à secagem supercrítica a alta temperatura (HTSCD) tem um desempenho ambiental superior ao aerogel inorgânico e ao aerogel HYB-C, para os dois valores de densidade atribuídos, mas inferior ao HYB-A. Estes resultados são explicados pelo elevado tempo de secagem de que o AI, o HYB-C e o LTSCD necessitam, fazendo aumentar o consumo de energia, principal causa do impacte ambiental na fase de produção dos aerogéis.

#### 4.4. Avaliação ambiental da produção das argamassas laboratoriais

Os aerogéis produzidos no laboratório do IST foram incorporados em argamassas produzidas também em laboratório. Uma vez que o objetivo seria obter um mapa comparativo com outras

argamassas de desempenho térmico melhorado, foram produzidas 31 versões com diferente composição.

Para a produção destas argamassas, foram utilizados diversos materiais que foram sendo otimizados ao longo do projeto Nanorender. Estes materiais e a sua fonte encontram-se nas Tabelas 4.17 e 4.18, respetivamente:

- cimento: CEM II B/L 32,5 N e CEM I 42,5 R;
- cal aérea hidratada: torna a argamassa mais porosa, o que reduz a condutibilidade térmica e ajuda na reologia da argamassa;
- cinzas volantes: tal como a cal aérea hidratada, as cinzas volantes ajudam a reduzir a quantidade necessária de cimento na argamassa; a resistência mecânica diminui mas a condutibilidade térmica também diminui;
- aerogel: um aerogel híbrido supercrítico comercial e dois aerogéis subcríticos produzidos em laboratório (inorgânico (AI) e um híbrido (HYB-C)) foram incorporados em argamassas para reduzir a condutibilidade térmica;
- agregados leves: permitem diminuir a quantidade de aerogel na argamassa sem se perder o desempenho térmico, embora reduzam a resistência mecânica das argamassas;
- areia: permite aumentar a resistência mecânica; a produção de argamassas com areia serviu como referência para as outras argamassas;
- éter de celulose: o éter de celulose torna a argamassa mais viscosa;
- tensoativos: ajudam à mistura do aerogel com a água (evitam a separação dos constituintes da argamassa), são introdutores de ar e evitam a separação dos constituintes da argamassa;
- resina: as argamassas com cinzas ou cal possuem uma mistura ligante mais fraca; a resina cria uma ligação química entre o agregado e o ligante ou entre agregados; foram utilizados tipos de resina:
  - resina em pó: permite fazer a mistura toda a seco;
  - resina líquida: a argamassa torna-se mais complicada de produzir porque é necessário controlar a água utilizada na mistura;
- água.

Para a avaliação ambiental das argamassas produzidas em laboratório, foram selecionadas cinco categorias de impacte ambiental. Estas categorias de impacte são AP, GWP, POCP, EP e PE-NRe. Foi calculado o impacte ambiental para 1 kg de cada matéria-prima utilizada e o seu valor multiplicado pela quantidade desse material na argamassa. O resultado foi depois convertido para o impacte total num metro quadrado de argamassa com 4 cm de espessura, tendo em conta a respetiva densidade.

A composição detalhada de cada argamassa encontra-se no Anexo confidencial 4.IV. Nas argamassas laboratoriais, optou-se por incorporar em sete delas o aerogel HYB-C por ser, de entre os três, o que apresenta melhores propriedades físicas, nomeadamente no que diz respeito ao controlo da granulometria.

As Tabelas 4.19 a 4.23 apresentam, para cada uma das categorias de impacte ambiental selecionadas, as cinco argamassas produzidas em laboratório que menos contribuem e as que mais

contribuem para essa categoria de impacto. É de salientar que, para todas as categorias de impacto ambiental, as argamassas com melhor desempenho ambiental são as mesmas. O mesmo se verifica para as argamassas com pior desempenho ambiental com a exceção da categoria de impacto ambiental AP.

Tabela 4.17. Composição das argamassas produzidas no laboratório do IST

Argamassa	CEM 32,5	CEM 42,5	Cal aérea hidratada	Cinzas volantes	Aerogel comercial a1	a2	a3	Inorgânico (Al)	Híbrido (HYB-C)	Agregados leves	Areia	Éter de celulose	Tensioativo	Resina líquida	Resina pó	Água
#1	x										x					x
#2	x										x	x		x		x
#3	x									x					x	x
#4	x									x		x		x		x
#5	x									x						x
#6	x									x		x		x		x
#7	x						x			x		x		x		x
#8	x						x			x		x		x		x
#9	x						x			x		x		x		x
#10	x						x				x	x		x		x
#11	x						x				x	x		x		x
#12	x						x				x	x		x		x
#13	x							x		x		x		x		x
#14	x				x							x	x			x
#15	x		x		x							x	x			x
#16	x			x	x							x	x			x
#17	x		x	x	x							x	x			x
#18			x		x							x	x			x
#19	x				x							x	x	x		x
#20			x		x					x		x	x			x
#21	x					x						x	x	x		x
#22	x					x						x	x	x		x
#23	x					x				x		x	x	x		x
#24	x					x				x		x	x	x		x
#25	x					x				x		x	x	x		x
#26	x								x	x		x	x			x
#27	x								x	x		x	x			x
#28	x								x		x	x	x			x
#29		x	x	x					x	x		x	x			x
#30		x	x	x					x	x		x	x		x	x
#31		x	x	x					x	x		x	x			x

Tabela 4.18. Fonte dos impactes ambientais das matérias-primas utilizadas na síntese das argamassas

<b>Matéria-prima</b>	
<b>Designação</b>	<b>Fonte [base de dados de ACV]</b>
<b>CEM 32,5</b>	Blengini (2006) – Tese de Doutoramento no IST com dados de uma fábrica portuguesa
<b>CEM 42,5</b>	
<b>Cal aérea hidratada</b>	<i>Lime, hydrated loose</i> [Ecoinvent]
<b>Cinzas volantes</b>	É um resíduo da indústria e, por esse motivo, não foram considerados impactes da sua produção
<b>Aerogel comercial a1</b>	No cálculo dos impactes destes materiais, foi usado o valor correspondente à média dos impactes dos três aerogéis produzidos em laboratório (HYB-A, HYB-C e inorgânico), dado não existirem outras fontes na literatura ou em bases de dados de ACV
<b>a2</b>	
<b>a3</b>	
<b>Inorgânico (AI)</b>	Os impactes dos aerogéis foram calculados nesta dissertação
<b>Hidrofóbico (HYB-C)</b>	
<b>Agregados leves</b>	Silvestre, J.D. (2012)
<b>Areia</b>	<i>Sand 0/2, wet and dry quarry, production mix</i> [ELCD]
<b>Éter de celulose</b>	Silvestre, J.D. (2012)
<b>Tensioativos</b>	
<b>Resina líquida</b>	<i>Acrylic binder, 34% in H<sub>2</sub>O</i> [Ecoinvent]
<b>Resina pó</b>	
<b>Água</b>	

Para o potencial de acidificação (Tabela 4.19), a argamassa que menos contribui para esta categoria de impacte ambiental é a #5 com um total de 0,018 kg SO<sub>2</sub> eq. num m<sup>2</sup>. Segue-se a argamassa #1 com mais 4,6% de impacte. Em terceiro lugar, encontra-se a argamassa #3 com um valor cerca de 16,2% superior ao da #5. Nos dois últimos lugares, encontram-se as argamassas #4 e #6, com valores muito superiores ao da #5 (85% e 128%, respetivamente). Na Figura 4.9, estão representadas as argamassas com melhor desempenho ambiental e o impacte total/m<sup>2</sup>.

As argamassas com maior impacte ambiental para esta categoria de impacte são as argamassas #26, #27, #28, #29 e #30. Todas elas apresentam valores muito aproximados de impacte, que ronda 4,36 kg SO<sub>2</sub> eq. num m<sup>2</sup>.

Tabela 4.19. Cinco argamassas com melhor e pior desempenho ambiental para o potencial de acidificação (AP, kg SO<sub>2</sub> eq)

AP [kg SO <sub>2</sub> eq]	
Argamassa	Impacte total/m <sup>2</sup>
#5	0,02
#1	+4,60%
#3	+16,16%
#4	+85,15%
#6	+128,37%
/	
#29	-0,03%
#26	-0,02%
#28	-0,01%
#30	-0,004%
#27	4,36

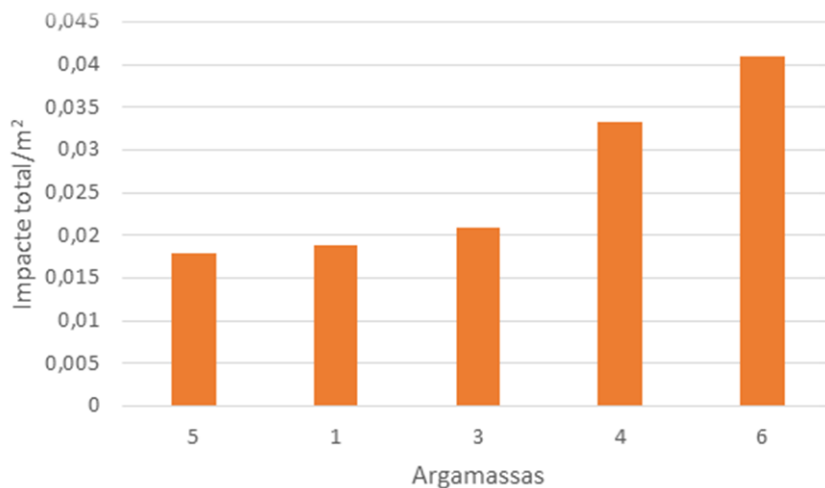


Figura 4.9. Argamassas com melhor desempenho ambiental na categoria AP (kg SO<sub>2</sub> eq)

Para o potencial de aquecimento global (Tabela 4.20), a argamassa que apresenta um melhor desempenho ambiental é a #5 com 6,32 kg CO<sub>2</sub> eq. por m<sup>2</sup>. Seguem-se as argamassas #1 e #3 com um aumento de cerca de 1,6% e 6,4%. As duas últimas apresentam um aumento superior, com um impacte cerca de 58% e 96%, respetivamente. Na Figura 4.10, estão indicadas as argamassas com pior desempenho ambiental e o impacte total/m<sup>2</sup>.

As argamassas com maior impacte ambiental para esta categoria de impacte são as argamassas #28, #27, #31, #29 e #30. A argamassa #28 tem um impacte de 2233,96 kg CO<sub>2</sub> eq. por m<sup>2</sup> e as restantes apresentam valores muito próximos, sendo que o maior aumento é de 0,12% relativamente ao impacte da argamassa com o pior desempenho ambiental.

Tabela 4.20. Cinco argamassas com melhor e pior desempenho ambiental para o potencial de aquecimento global (GWP, kg CO<sub>2</sub> eq)

GWP [kg CO <sub>2</sub> eq]	
Argamassa	Impacte total/m <sup>2</sup>
#5	6,32
#1	+1,66%
#3	+6,41%
#4	+58,04%
#6	+96,07%
/	
#28	-0,12%
#27	-0,11%
#31	-0,01%
#29	-0,01%
#30	2236,79

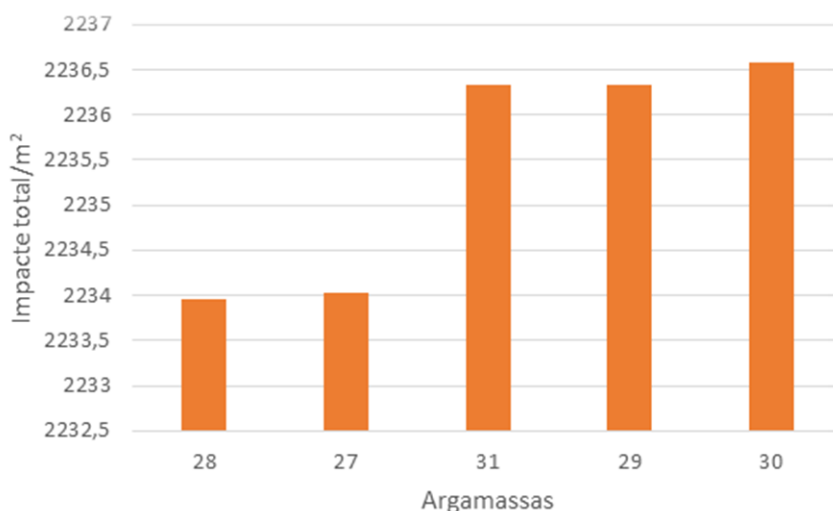


Figura 4.10. Argamassas com pior desempenho ambiental na categoria GWP (kg CO<sub>2</sub> eq)

Na Tabela 4.21, estão indicadas as cinco argamassas que apresentam maior e menor impacte ambiental para o POCP. Uma vez mais, a argamassa #5 apresenta o menor impacto ambiental nesta categoria com um valor de 0,00053 kg C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> eq. num m<sup>2</sup>. As argamassas #1 e #3 também apresentam um impacte ambiental reduzido com 5,3% e 35,3%, respetivamente, de aumento em relação ao da #5. Por último, e apesar de ainda estarem incluídas nas argamassas com menos impacte ambiental nesta categoria, as #4 e #6 apresentam um aumento muito significativo em relação à #5 com valores 359,92% e 603,9% superiores. Na Figura 4.11, estão indicadas as argamassas com melhor desempenho ambiental e o impacte total/m<sup>2</sup>.



As argamassas com maior impacto ambiental para esta categoria de impacto são as #28, #27, #31, #29 e #30. A argamassa #28 tem um impacto de 0,48 kg C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> eq. por m<sup>2</sup>, e a argamassa com maior impacto nesta categoria (#30) tem um valor 0,17% superior a este.

Tabela 4.21. Cinco argamassas com melhor e pior desempenho ambiental para o potencial de formação fotoquímica de ozono (POCP, kg C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> eq)

POCP [kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> eq]	
Argamassa	Impacte total/m <sup>2</sup>
#5	0,000532
#1	+5,25%
#3	+35,35%
#4	+359,92%
#6	+603,90%
/	
#28	-0,17%
#27	-0,16%
#31	-0,03%
#29	-0,03%
#30	0,4788

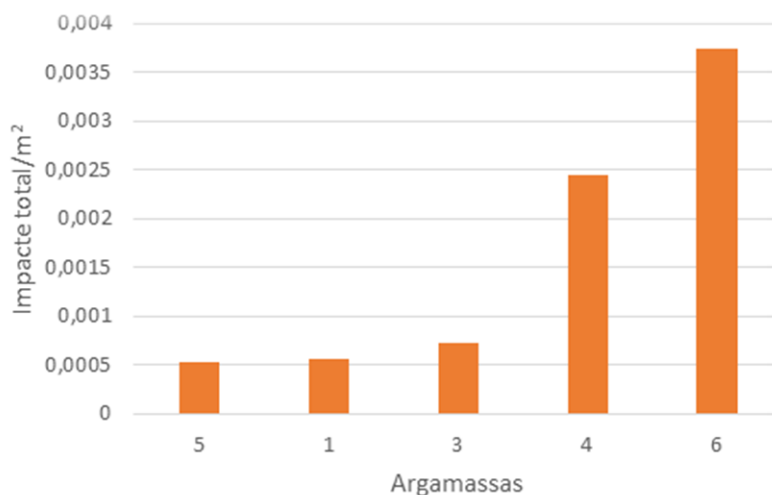


Figura 4.11. Argamassas com melhor desempenho ambiental na categoria POCP (kg C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> eq)

Para a categoria de impacto EP (Tabela 4.22), a argamassa #5 apresenta um melhor desempenho ambiental avaliado em 0,0025 kg PO<sub>4</sub><sup>3-</sup> eq. por m<sup>2</sup>. Seguem-se as argamassas #1 e #3 com um aumento de cerca de 3,43% e 28,55%. As duas últimas argamassas (#4 e #6) têm um impacto muito superior mas, ainda assim, estão incluídas nas argamassas com menor impacto ambiental. Estas apresentam valores 219% e 355% superiores ao da #5.

As argamassas #28, #27, #31, #29 e #30 apresentam o maior impacto ambiental para esta categoria de impacto. A argamassa #28 tem um impacto de 1,19 kg PO<sub>4</sub><sup>3-</sup> eq. por m<sup>2</sup> e, uma vez mais, as restantes apresentam valores muito próximos. Na Figura 4.12, estão representadas as argamassas com pior desempenho ambiental e o impacto total/m<sup>2</sup>.

Tabela 4.22. Cinco argamassas com melhor e pior desempenho ambiental para o potencial de eutrofização (EP, kg PO<sub>4</sub><sup>3-</sup> eq)

EP [kg PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> eq]	
Argamassa	Impacte total/m <sup>2</sup>
#5	0,0025
#1	+3,43%
#3	+28,55%
#4	+219,33%
#6	+354,99%
/	
#28	-0,07%
#27	-0,06%
#31	-0,03%
#29	-0,03%
#30	1,195

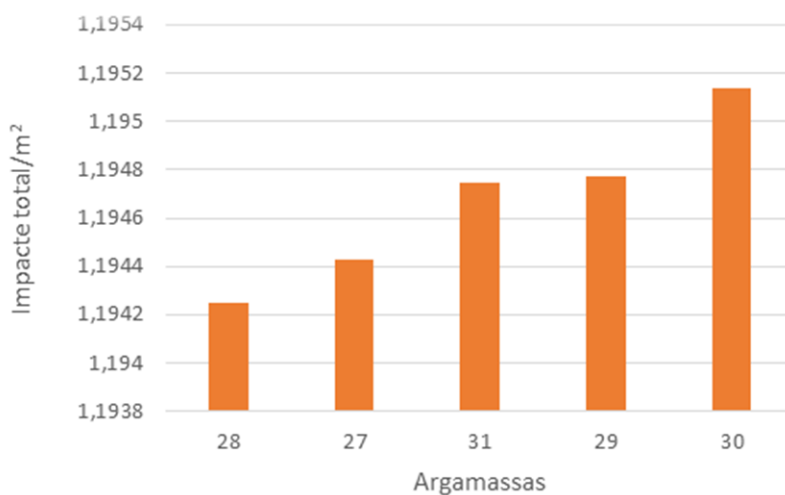


Figura 4.12. Argamassas com pior desempenho ambiental na categoria EP (kg PO<sub>4</sub><sup>3-</sup> eq)

As argamassas que menos contribuem para o potencial de PE-NRe (Tabela 4.23) são as #5, #1, #3, #4 e #6. A argamassa #5 tem um impacto total de 39,8 MJ por m<sup>2</sup>. Segue-se a argamassa de referência que apresenta um valor próximo deste, com um aumento de 4,5%. As restantes argamassas (#3, #4 e #6) apresentam valores mais elevados, entre 52,7 e 414% superiores ao da #5.

Por sua vez, as argamassas com maior impacto para esta categoria de impacto ambiental são as #26, #27, #28, #29 e #30. A argamassa #28 tem um impacto total de 39049 MJ por m<sup>2</sup> e a que apresenta um maior impacto é a #30, com um valor de 39094,27 MJ por m<sup>2</sup>. Na Figura 4.13, estão representadas as argamassas com pior desempenho ambiental e o seu impacto total/m<sup>2</sup>.

Tabela 4.23. Cinco argamassas com melhor e pior desempenho ambiental para o PE-NRe (MJ)

PE-NRe [MJ]	
Argamassa	Impacte total/m <sup>2</sup>
#5	39,79596
#1	+4,56%
#3	+52,74%
#4	+275,24%
#6	+414,03%
/	
#28	-0,12%
#27	-0,10%
#31	-0,02%
#29	-0,02%
#30	39094,27

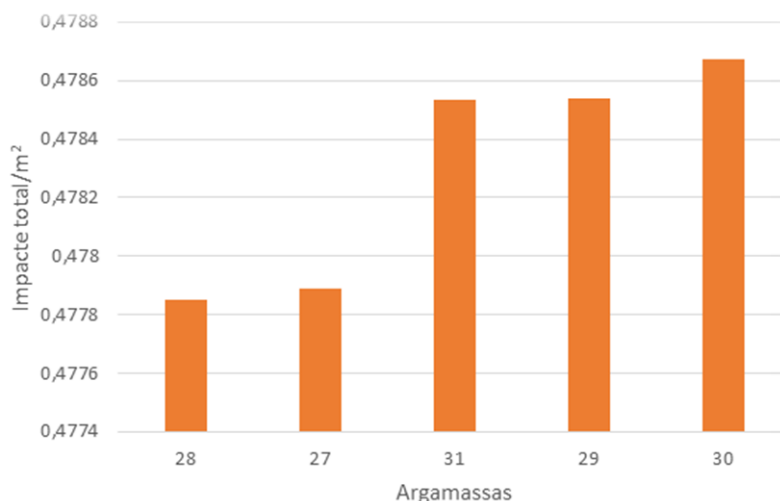


Figura 4.13. Argamassas com pior desempenho ambiental na categoria PE-NRe (MJ)

As Tabelas 4.24, 4.25 e 4.26 apresentam os resultados da ACV para as fases (A1-A3) da argamassa com melhor desempenho ambiental em todas as categorias, #5, e das argamassas com pior desempenho ambiental, #27 e #30.

As Figuras 4.14, 4.15 e 4.16 apresentam a contribuição relativa das fases (A1-A3), em percentagem, para cada indicador de categoria de impacto ambiental, da argamassa com melhor desempenho ambiental, #5, e das argamassas com pior desempenho ambiental, #27 e #30.

Tabela 4.24. Resultados da ACV para as fases (A1-A3) para a argamassa #5

Indicador	Unidade	Impacte total/m2	A1	A2	A3.1	A3.2	A3.3
PE-NRe	[MJ]	5,25E+01	3,98E+01	3,93E+00	4,16E+00	4,21E+00	3,59E-01
PE-Re	[MJ]	1,21E+01	1,97E+00	6,19E-03	9,40E+00	5,00E-01	1,87E-01
ADP	[kg Sb eq]	3,15E-02	2,68E-02	1,92E-03	1,74E-03	9,11E-04	1,57E-04
AP	[kg SO2 eq]	2,34E-02	1,79E-02	3,73E-03	8,97E-04	7,07E-04	8,45E-05
EP	[kg PO43- eq]	3,56E-03	2,51E-03	4,79E-04	3,33E-04	2,00E-04	3,04E-05
GWP	[kg CO2 eq]	6,93E+00	6,32E+00	2,88E-01	1,77E-01	1,22E-01	1,92E-02
ODP	[kg CFC-11 eq]	7,11E-07	6,89E-07	5,88E-10	1,07E-08	9,97E-09	8,43E-10
POCP	[kg C2H4]	7,45E-04	5,32E-04	1,02E-04	7,70E-05	2,78E-05	6,23E-06

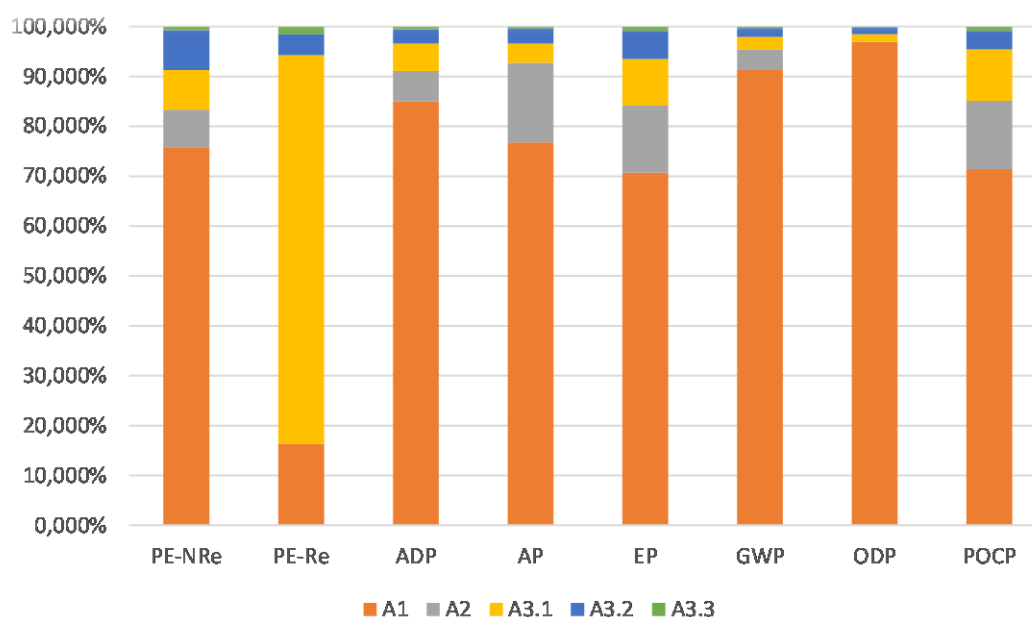


Figura 4.14. Contribuição relativa das fases (A1-A3) da argamassa #5 para cada indicador de categoria de impacto ambiental

Na argamassa #5, a fase de extração de matérias-primas e processamento é aquela onde estão concentrados a maioria dos impactes ambientais para todas as categorias de impacte, com a exceção da PE-Re (Figura 4.14). Nesta categoria, a fase relacionada com as embalagens do produto, (A3.1), é responsável por cerca de 78% dos impactes ambientais (Tabela 4.24).

Tabela 4.25. Resultados da ACV para as fases (A1-A3) para a argamassa #27

Indicador	Unidade	Impacte total/m2	A1	A2	A3.1	A3.2	A3.3
PE-NRe	[MJ]	3,91E+04	3,91E+04	6,48E+00	6,86E+00	6,94E+00	5,92E-01
PE-Re	[MJ]	5,86E+03	5,84E+03	1,02E-02	1,55E+01	8,24E-01	3,08E-01
ADP	[kg Sb eq]	1,88E+01	1,88E+01	3,17E-03	2,86E-03	1,50E-03	2,59E-04
AP	[kg SO2 eq]	4,37E+00	4,36E+00	6,14E-03	1,48E-03	1,17E-03	1,39E-04
EP	[kg PO43- eq]	1,20E+00	1,19E+00	7,89E-04	5,49E-04	3,29E-04	5,01E-05
GWP	[kg CO2 eq]	2,24E+03	2,23E+03	4,75E-01	2,91E-01	2,01E-01	3,17E-02
ODP	[kg CFC-11 eq]	2,77E-04	2,77E-04	9,69E-10	1,76E-08	1,64E-08	1,39E-09
POCP	[kg C2H4]	4,78E-01	4,78E-01	1,68E-04	1,27E-04	4,59E-05	1,03E-05

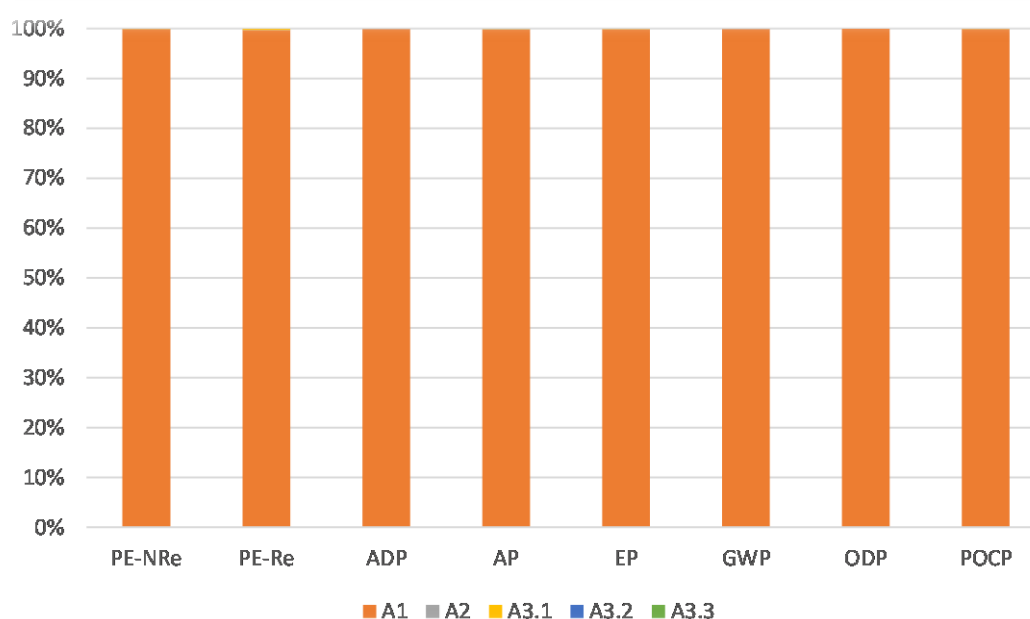


Figura 4.15. Contribuição relativa das fases (A1-A3) da argamassa #27 para cada indicador de categoria de impacto ambiental

A fase de extração das matérias-primas e processamento (A1) é responsável pela maioria dos impactos ambientais da argamassa #27 (Tabela 4.25 e Figura 4.15).

Tabela 4.26. Resultados da ACV para as fases (A1-A3) para a argamassa #30

Indicador	Unidade	Impacte total/m2	A1	A2	A3.1	A3.2	A3.3
PE-NRe	[MJ]	3,91E+04	3,91E+04	6,84E+00	7,25E+00	7,34E+00	6,25E-01
PE-Re	[MJ]	5,86E+03	5,84E+03	1,08E-02	1,64E+01	8,71E-01	3,26E-01
ADP	[kg Sb eq]	1,88E+01	1,88E+01	3,35E-03	3,02E-03	1,59E-03	2,73E-04
AP	[kg SO2 eq]	4,37E+00	4,36E+00	6,49E-03	1,56E-03	1,23E-03	1,47E-04
EP	[kg PO43- eq]	1,20E+00	1,20E+00	8,34E-04	5,80E-04	3,48E-04	5,29E-05
GWP	[kg CO2 eq]	2,24E+03	2,24E+03	5,01E-01	3,07E-01	2,12E-01	3,35E-02
ODP	[kg CFC-11 eq]	2,77E-04	2,77E-04	1,02E-09	1,86E-08	1,74E-08	1,47E-09
POCP	[kg C2H4]	4,79E-01	4,79E-01	1,77E-04	1,34E-04	4,84E-05	1,08E-05

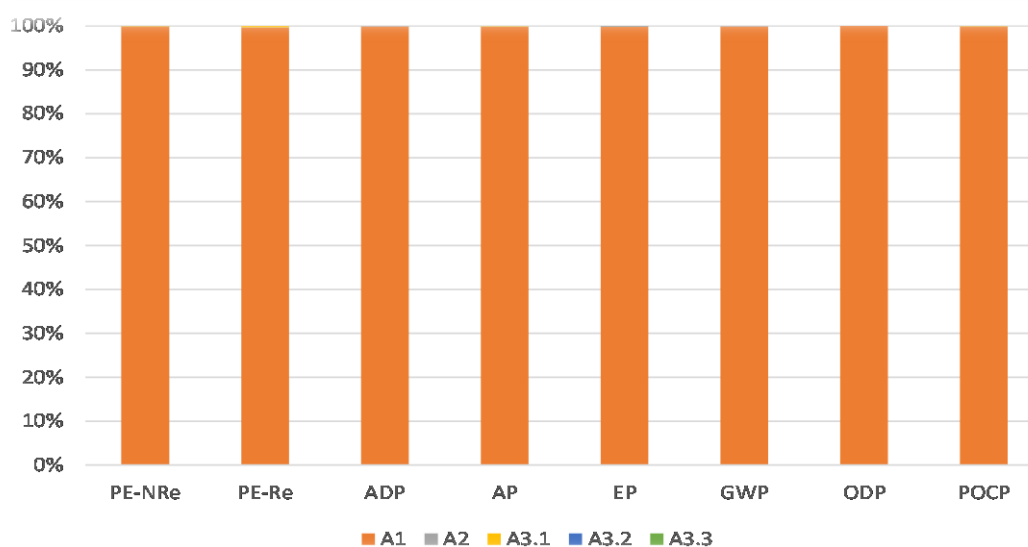


Figura 4.16. Contribuição relativa das fases (A1-A3) da argamassa #30 para cada indicador de categoria de impacto ambiental

À semelhança da argamassa #27, a fase de extração de matérias-primas e processamento (A1) apresenta para a argamassa #30 um impacte superior a 99% para todas as categorias de impacte ambiental (Tabela 4.26 e Figura 4.16).

Verifica-se que as argamassas com aerogel na sua composição são aquelas que apresentam um pior desempenho ambiental. Por exemplo, nas argamassas #29 e #30, o aerogel HYB-C é responsável por 97% dos impactes. Os impactes ambientais dos aerogéis dizem respeito à sua produção em laboratório, o que influencia o desempenho ambiental da argamassa. Estes dados foram também utilizados para calcular os impactes das argamassas com aerogel comercial e, por isso, os resultados das mesmas ficam enviesados por essa via. No entanto, a uma escala industrial, estes impactes podem ser atenuados aumentando o tamanho do lote e utilizando uma produção contínua. A utilização de equipamentos mais eficientes também permite reduzir o consumo de eletricidade, o principal causador dos impactes durante a fase de produção.

As argamassas com melhor desempenho ambiental são as mesmas para os cinco indicadores de impacte ambiental. A argamassa #5 é a que apresenta um melhor desempenho e é constituída por cimento, agregados leves e água. O principal agregado leve utilizado é um subproduto da indústria e,

por isso, não tem um impacto ambiental significativo associado, o que permite a esta argamassa distinguir-se positivamente das restantes. Nestas argamassas, a matéria-prima que mais impactes provoca é o cimento, com valores superiores a 98%.

#### 4.5. Desempenho ambiental de argamassas comerciais de desempenho térmico melhorado

A avaliação ambiental de argamassas de desempenho térmico melhorado disponível no mercado é referente a uma solução produzida em Portugal (Patente PT 105937, 2013). A ACV do berço ao portão da fábrica foi desenvolvida por Silvestre (2012) e os resultados usados para a modelação desta argamassa. A composição considerada para esta argamassa comercial (AC) e os respetivos processos utilizados para a modelação no SimaPro encontram-se na Tabela 4.27.

Tabela 4.27. Composição da argamassa de desempenho térmico melhorado comercial e respetivos processos no SimaPro

Matéria-prima	Composição média (%)	Processo usado no SimaPro
Agregado de calcário ou silicioso	37,5	Agregados calcários
Cimento Portland	50	CEM I 52,5 R
Granulado de cortiça	10	Só simulação de transporte (50 km)
Hidróxido de cálcio ou hidróxido de magnésio	1	<i>Lime, hydrated, loose</i>
Derivado de celulose	0,48	<i>Retarding admixture – MEHEC (Methyl Ethyl HydroxyEthyl Cellulose)</i>
Pó redispersível	0	Selecionado de entre resinas acrílicas, derivados polivinílicos ou suas misturas
Hidrófobo em pó - estearato de cálcio ou zinco	1,01	Aditivo – Oleato de sódio
Agente introdutor de ar - preferencialmente um alfaoleofinossulfonato	0,005	<i>Air entraining admixtures</i>

Na Tabela 4.28, estão identificadas as contribuições, para cada categoria de impacto ambiental, das fases (A1-A3) para 4 cm desta argamassa (densidade de 825 kg/m<sup>3</sup>) aplicados num m<sup>2</sup> de parede. A contribuição relativa destas fases está apresentada, em percentagem, na Figura 4.17 e na Tabela 4.29.

Para cada indicador de categoria, a fase (A1) apresenta valores sempre acima de 80%, com a exceção do PE-Re com 26%. A produção da argamassa (A3.2) tem um impacto ambiental muito reduzido quando comparado com a fase da extração das matérias-primas. É de salientar que a produção desta argamassa ocorre numa instalação industrial, onde os processos estão otimizados e os equipamentos têm uma eficiência superior aos de um laboratório.

Tabela 4.28. Resultados da ACV para as fases (A1-A3) para a argamassa comercial

Indicador	Unidade	Impacte total/m <sup>2</sup>	Fases do ciclo de vida (para 1 kg de produto acabado)				
			A1	A2	A3.1	A3.2	A3.3
PE-NRe	[MJ]	1,09E+02	8,97E+01	3,59E+00	7,72E+00	7,79E+00	6,66E-01
PE-Re	[MJ]	2,54E+01	6,72E+00	4,81E-03	1,74E+01	9,25E-01	3,47E-01
ADP	[kg Sb eq]	6,09E-02	5,40E-02	1,76E-03	3,22E-03	1,68E-03	2,91E-04
AP	[kg SO <sub>2</sub> eq]	4,12E-02	3,69E-02	1,15E-03	1,66E-03	1,36E-03	1,57E-04
EP	[kg PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> eq]	6,59E-03	5,29E-03	2,62E-04	6,18E-04	3,67E-04	5,63E-05
GWP	[kg CO <sub>2</sub> eq]	1,33E+01	1,25E+01	2,54E-01	3,28E-01	2,25E-01	3,57E-02
ODP	[kg CFC-11 eq]	1,80E-06	1,76E-06	4,84E-10	1,98E-08	1,84E-08	1,56E-09
POCP	[kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> ]	1,55E-03	1,32E-03	2,65E-05	1,43E-04	5,13E-05	1,15E-05

Tabela 4.29. Resultados da ACV (%) para as fases (A1-A3) para a argamassa comercial

Indicador	Unidade	Impacte total/m <sup>2</sup>	Fases do ciclo de vida (para 1 kg de produto acabado)				
			A1	A2	A3.1	A3.2	A3.3
PE-NRe	[MJ]	100%	82%	3%	7%	7%	1%
PE-Re	[MJ]	100%	26%	0%	69%	4%	1%
ADP	[kg Sb eq]	100%	89%	3%	5%	3%	0%
AP	[kg SO <sub>2</sub> eq]	100%	89%	3%	4%	3%	0%
EP	[kg PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> eq]	100%	80%	4%	9%	6%	1%
GWP	[kg CO <sub>2</sub> eq]	100%	94%	2%	2%	2%	0%
ODP	[kg CFC-11 eq]	100%	98%	0%	1%	1%	0%
POCP	[kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> ]	100%	85%	2%	9%	3%	1%

Comparando o desempenho ambiental da argamassa comercial com o das argamassas produzidas em laboratório, pode-se concluir que esta se encontra incluída no grupo com menores impactes ambientais. No entanto, quando comparada com a argamassa que melhor desempenho apresenta no conjunto total das argamassas produzidas em laboratório (argamassa #5), os impactes desta são superiores em cerca de 100 a 190%. As matérias-primas utilizadas na produção da argamassa #5 também se encontram na argamassa comercial, ainda que em menor quantidade. À argamassa comercial foram adicionados outros materiais com impactes ambientais reduzidos, como é o caso do agregado de calcário.



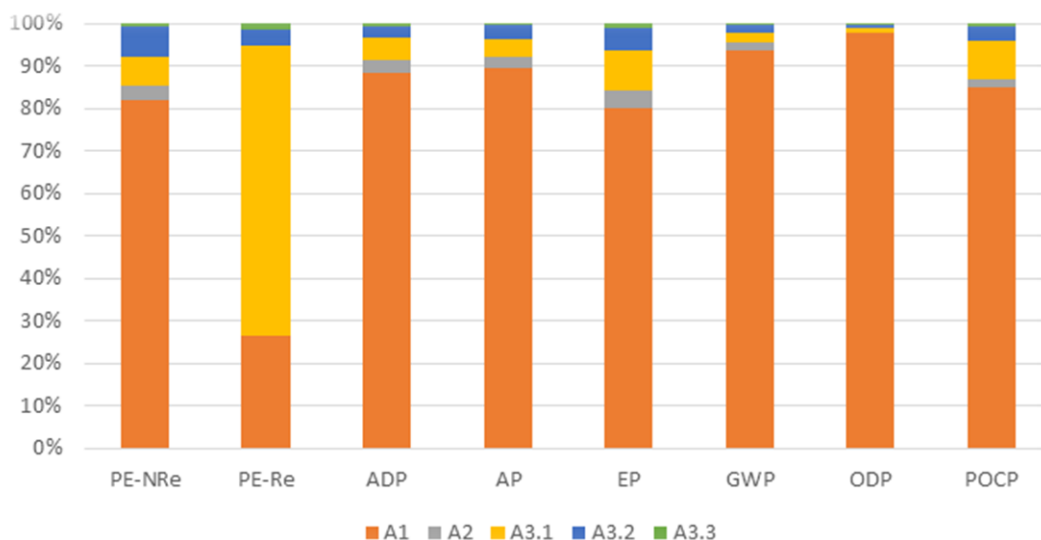


Figura 4.17. Contribuição relativa das fases (A1-A3) para cada indicador de categoria de impacto ambiental para a argamassa comercial

Na Tabela 4.30 a 4.34, encontram-se as cinco argamassas com melhor desempenho ambiental para o indicador PE-NRe, POCP, GWP, EP e AP.

Tabela 4.30. Cinco argamassas com melhor desempenho ambiental para o PE-NRe, incluindo a argamassa comercial

PE-NRe [MJ]	
Argamassa	Impacte total/m <sup>2</sup>
#5	39,80
#1	+5%
#3	+53%
#AC	+174%
#4	+275%

Tabela 4.31. Cinco argamassas com melhor desempenho ambiental para o POCP, incluindo a argamassa comercial

POCP (kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> eq)	
Argamassa	Impacte total/m <sup>2</sup>
#5	0,0007
#1	5%
#AC	191%
#4	360%
#6	604%

Tabela 4.32. Cinco argamassas com melhor desempenho ambiental para o GWP, incluindo a argamassa comercial

<b>GWP (kg CO<sub>2</sub> eq)</b>	
<b>Argamassa</b>	<b>Impacte total/m<sup>2</sup></b>
#5	6,32
#1	2%
#4	58%
#6	96%
#AC	110%

Tabela 4.33. Cinco argamassas com melhor desempenho ambiental para o EP, incluindo a argamassa comercial

<b>EP (kg PO<sub>4</sub><sup>3-</sup> eq)</b>	
<b>Argamassa</b>	<b>Impacte total/m<sup>2</sup></b>
#5	0,0025
#1	3%
#AC	162%
#4	219%
#6	355%

Tabela 4.34. Cinco argamassas com melhor desempenho ambiental para o AP, incluindo a argamassa comercial

<b>AP (kg SO<sub>2</sub> eq)</b>	
<b>Argamassa</b>	<b>Impacte total/m<sup>2</sup></b>
#5	0,018
#1	5%
#AC	130%
#4	85%
#6	128%



## 5. Mapa comparativo de desempenho ambiental de argamassas de desempenho térmico melhorado

No presente capítulo, realiza-se uma análise comparativa entre os impactes ambientais (PE-NRE, POCP, AP, GWP e EP) da fase de produto (A1-A3) para 4 cm de cada uma das argamassas estudadas no Capítulo 4, e a correspondente condutibilidade térmica ( $\lambda_{28}$ ). Desta forma, realiza-se uma estimativa do potencial isolamento térmico fornecido por cada alternativa, lado a lado com os impactes ambientais de soluções a utilizar para o mesmo fim e com idênticas características construtivas. Esta comparação encontra-se representada nas Figuras 5.1 a 5.12, com vários níveis de detalhe, tendo em vista a minimização dos impactes nas 5 categorias analisadas, a par da otimização do desempenho térmico da envolvente do edifício onde estas argamassas possam ser aplicadas.

Analisando as Figuras 5.1 a 5.12, verifica-se que existem argamassas com impactes ambientais muito próximos, tendo no entanto sido dada mais ênfase às argamassas com maior e menor impacto ambiental.

No grupo de argamassas com melhor desempenho ambiental em todas as categorias de impacto (representadas a vermelho), encontram-se as argamassas #1, #2, #3, #4, #5, #6 e #AC. A argamassa de referência #1 apresenta o pior desempenho térmico ( $\lambda=1,38$  W/m.°C), o que seria de esperar uma vez que não possui agregados leves. A argamassa #2 tem uma composição semelhante à da de referência (apesar de incluir também resina) e, por isso, também apresenta uma condutibilidade térmica elevada (0,90 W/m.°C). As argamassas #3, #4 e #AC apresentam valores de condutibilidade térmica inferiores, mas ainda assim elevados (0,20, 0,17 e 0,16 W/m.°C, respetivamente), porque foram adicionados agregados leves mas em quantidades reduzidas. Ainda nas argamassas com menor impacto ambiental, as argamassas #5 e #6 são as que apresentam valores de condutibilidade térmica mais baixos (0,08 e 0,09 W/m.°C, respetivamente). Estas argamassas são constituídas por agregados leves que são subprodutos da indústria e que conferem à argamassa propriedades isolantes.

As argamassas com o aerogel híbrido subcrítico incorporado (#26, #27, #28, #29, #30 e #31), representadas a amarelo, são aquelas que apresentam maiores impactes ambientais. Como referido na secção 4.4, é preciso ter em atenção que o aerogel utilizado foi produzido em laboratório, o que influencia negativamente o resultado dos seus impactes ambientais. No entanto, é visível que estas argamassas também não apresentam os melhores valores de condutibilidade térmica, que se situam entre 0,10 e 0,27 W/m.°C. Na argamassa #28 (com  $\lambda=0,27$  W/m.°C), foi utilizada uma menor percentagem de aerogel e adicionada areia, o que explica a maior condutibilidade térmica relativamente às restantes argamassas com aerogel. A composição das restantes argamassas deste grupo é muito semelhante, variando apenas na percentagem de cada matéria-prima, o que explica os valores de condutibilidade térmica semelhantes.

A argamassa #18 apresenta o melhor desempenho térmico ( $\lambda=0,06$  W/m.°C) mas também impactes ambientais relativamente elevados em todas as categorias de impacto. Esta argamassa foi produzida em laboratório com materiais que lhe conferem propriedades isolantes, nomeadamente o aerogel híbrido supercrítico comercial (cerca de 19,7%) e cal aérea hidratada (cerca de 79,8%).

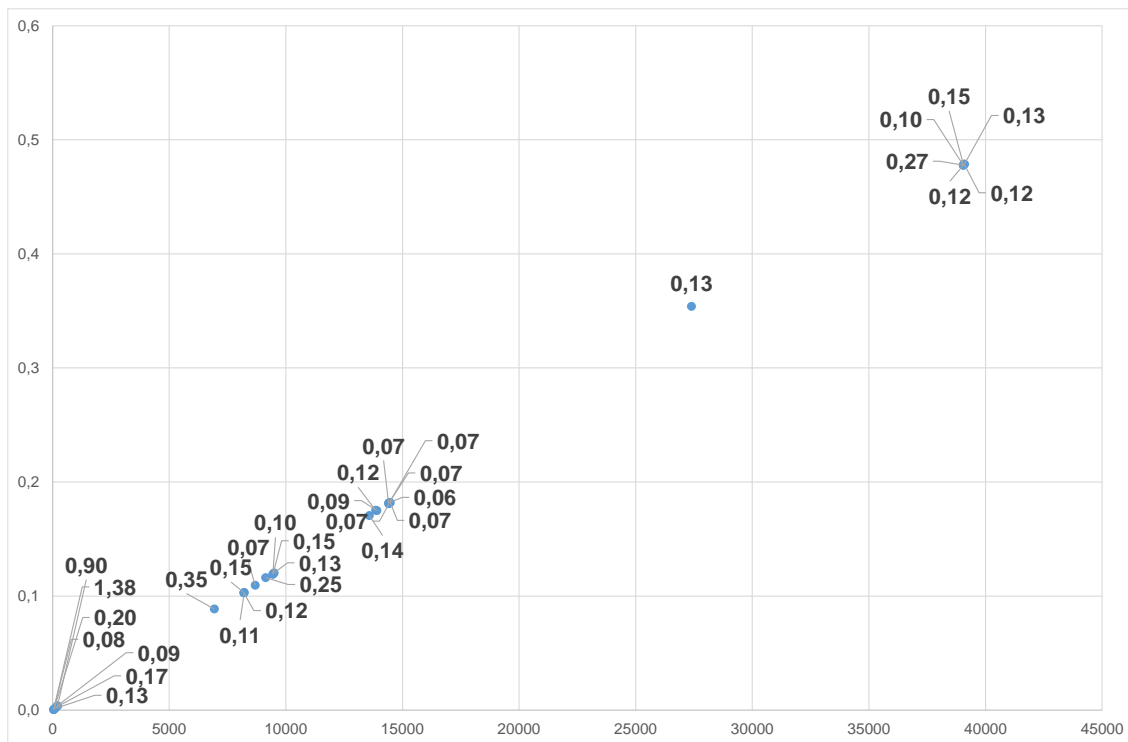


Figura 5.1. PE-NRE (nas abcissas, MJ) e POCP (nas ordenadas, kg C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> eq) para as argamassas produzidas em laboratório e onde cada ponto corresponde à condutibilidade térmica (W/m.°C)

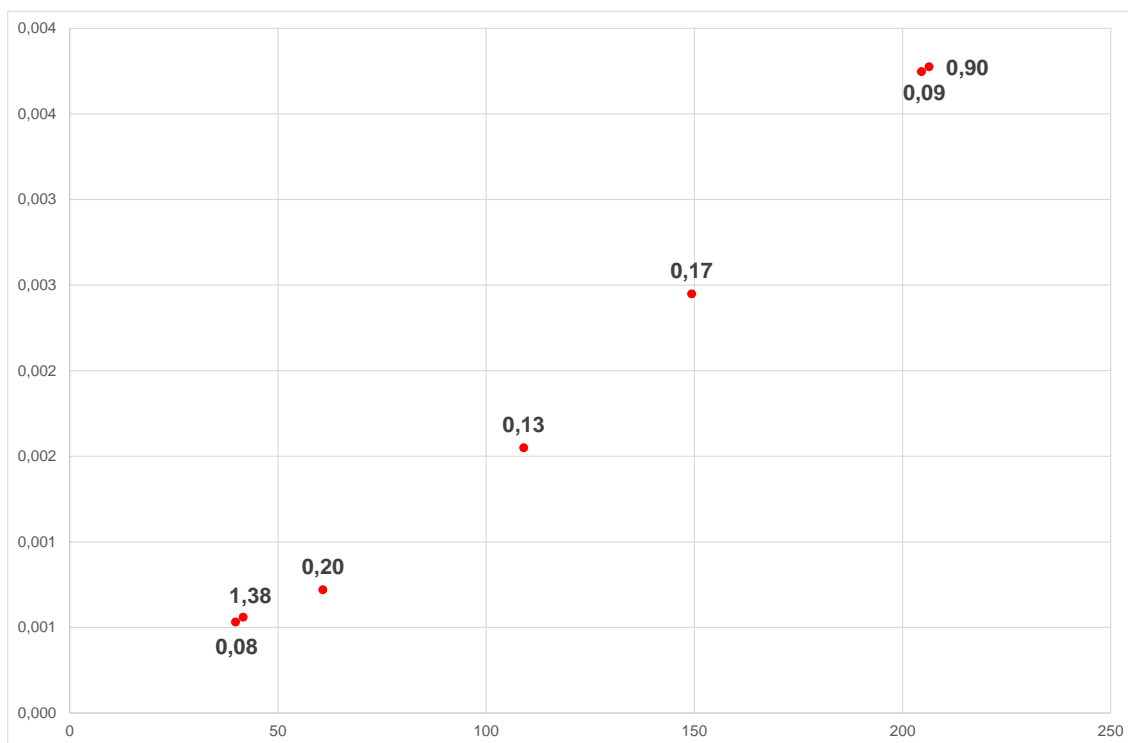


Figura 5.2. PE-NRE (nas abcissas, MJ) e POCP (nas ordenadas, kg C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> eq) para as argamassas com menor impacto ambiental produzidas em laboratório e onde cada ponto corresponde à respetiva condutibilidade térmica (W/m.°C)

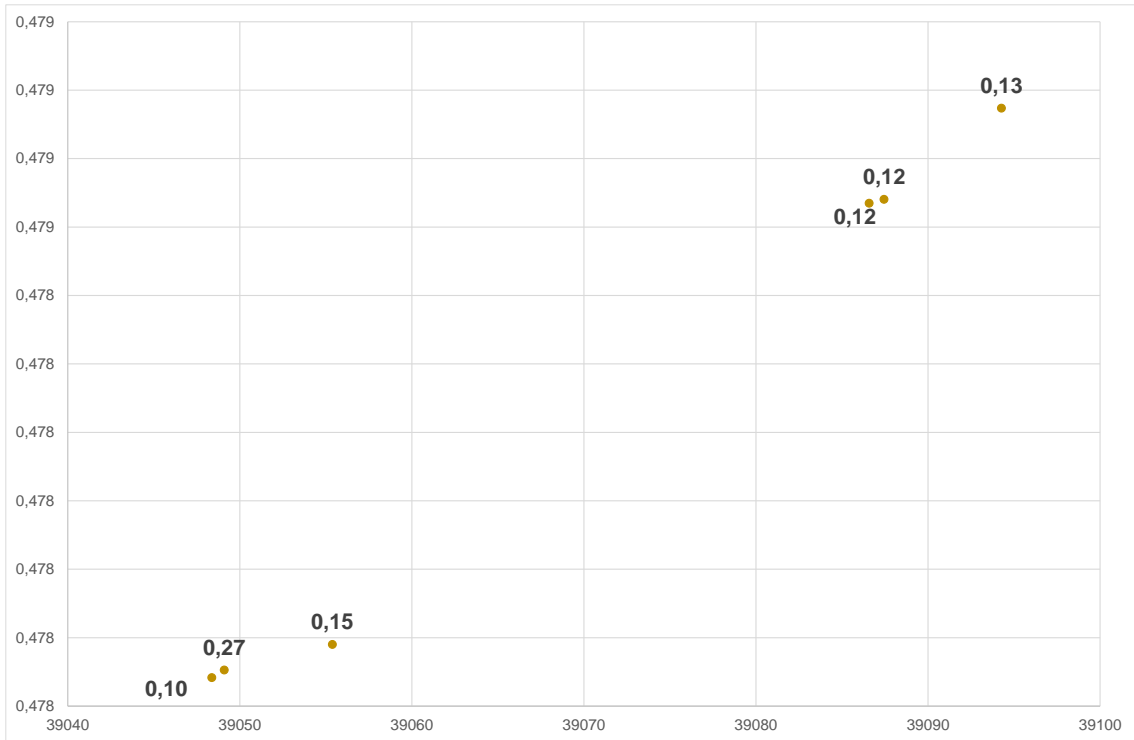


Figura 5.3. PE-NRE (nas abcissas, MJ) e POCP (nas ordenadas, kg C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> eq) para as argamassas com maior impacto ambiental produzidas em laboratório e onde cada ponto corresponde à respetiva condutibilidade térmica (W/m.°C)

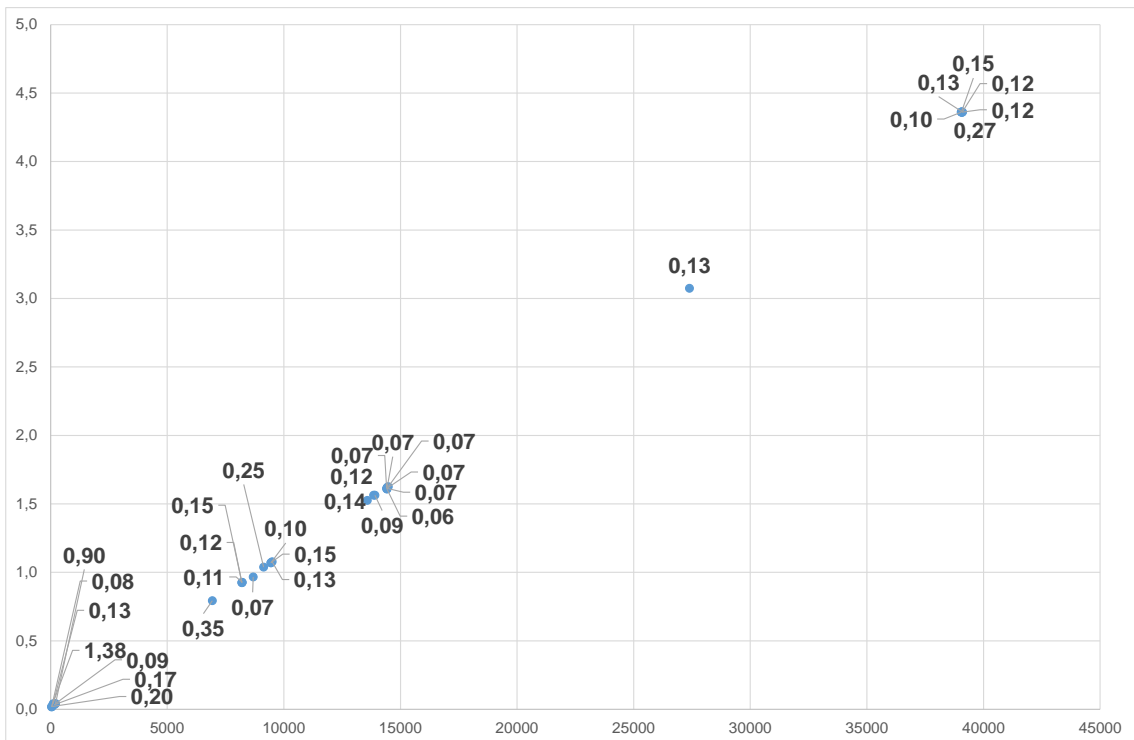


Figura 5.4. PE-NRE (nas abcissas, MJ) e AP (nas ordenadas, kg SO<sub>2</sub> eq) para as argamassas produzidas em laboratório e onde cada ponto corresponde à condutibilidade térmica (W/m.°C)

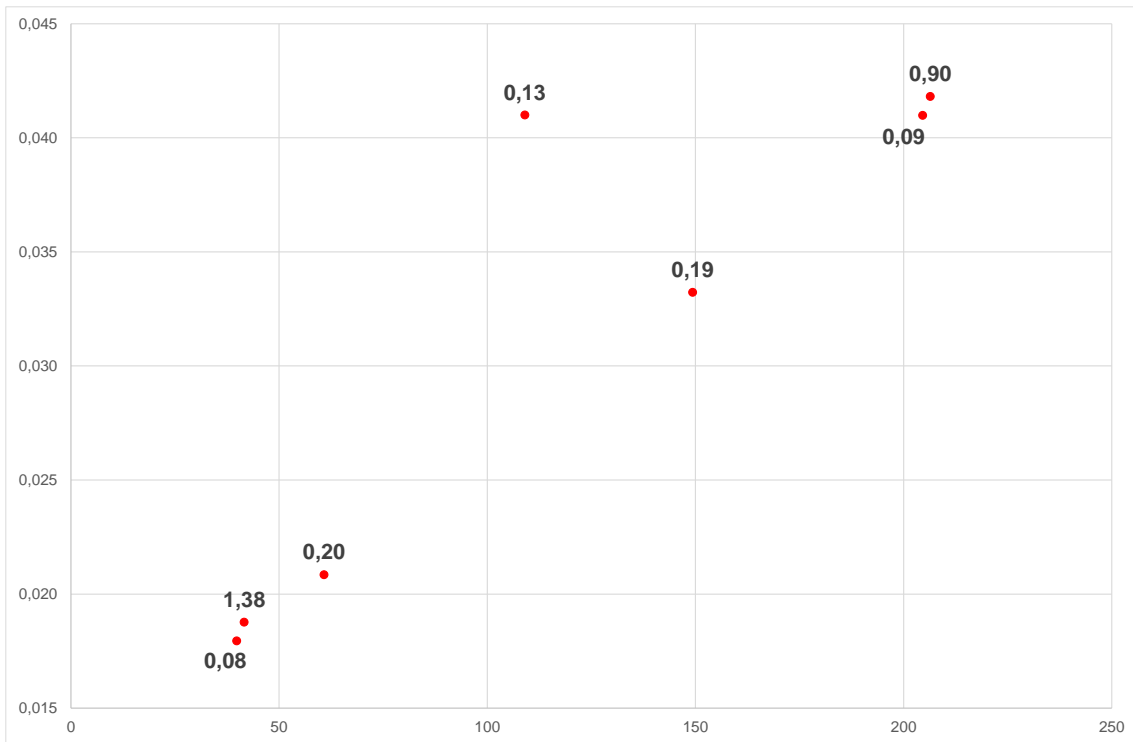


Figura 5.5. PE-NRE (nas abcissas, MJ) e AP (nas ordenadas, kg SO<sub>2</sub> eq) para as argamassas com menor impacto ambiental produzidas em laboratório e onde cada ponto corresponde à respetiva condutibilidade térmica (W/m.°C)

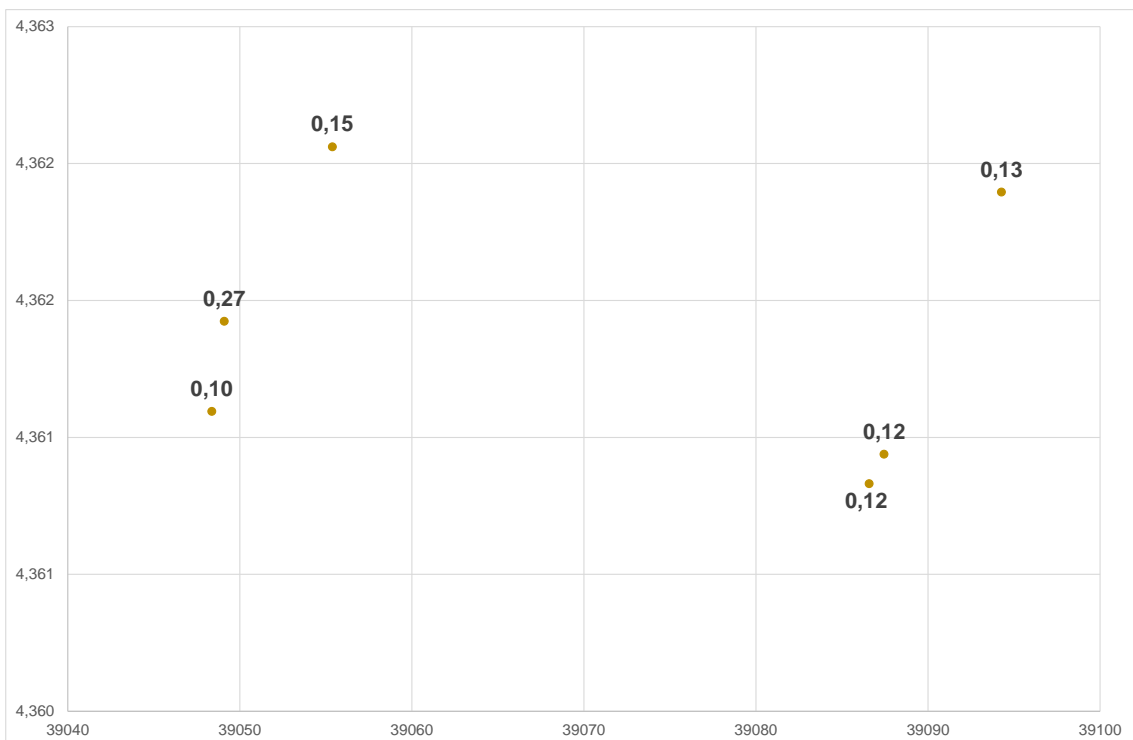


Figura 5.6. PE-NRE (nas abcissas, MJ) e AP (nas ordenadas, kg SO<sub>2</sub> eq) para as argamassas com maior impacto ambiental produzidas em laboratório e onde cada ponto corresponde à respetiva condutibilidade térmica (W/m.°C)

Pode-se concluir que a argamassa #5 é aquela que apresenta uma melhor relação entre os impactos ambientais e a condutibilidade térmica, em todas as categorias de impacto ambiental.

As argamassas que apresentam uma melhor condutibilidade térmica têm impactos ambientais para o POCP médios, como é o caso das argamassas #14 à #20 (Figura 5.1). Nesta categoria de impacto, a argamassa #5 é aquela que apresenta uma melhor relação entre o desempenho térmico e ambiental. Por sua vez, a argamassa #1 apresenta o pior desempenho térmico mas tem poucos impactos ambientais nesta categoria (Figura 5.2). O mesmo se passa para a argamassa #2 e #10. As argamassas com pior desempenho ambiental apresentam valores na ordem de 0,15 W/m.°C (Figura 5.3).

Para a categoria de impacto AP, a argamassa #5 tem o melhor impacto ambiental e uma condutibilidade térmica reduzida (0,08 W/m.°C) (Figura 5.4). As restantes argamassas com menores impactos ambientais apresentam valores de condutibilidade térmica relativamente elevados (Figura 5.5). As argamassas com melhor condutibilidade térmica têm impactos ambientais médios. A condutibilidade térmica das argamassas com pior desempenho ambiental ronda os 0,15 W/m.°C (Figura 5.6).

À exceção da argamassa #5, as argamassas que apresentam um melhor desempenho ambiental para a categoria de impacto GWP têm valores de condutibilidade térmica elevados (Figuras 5.7 e 5.8). As argamassas com pior desempenho ambiental apresentam valores na ordem de 0,15 W/m.°C (Figura 5.9).

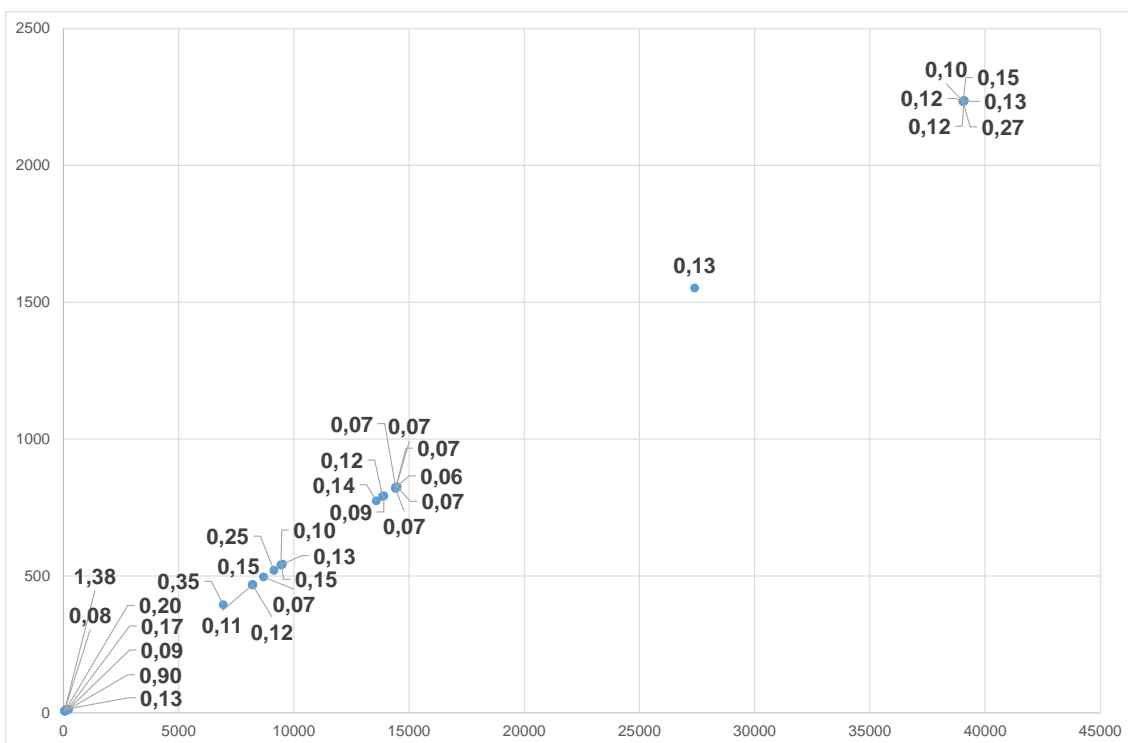


Figura 5.7. PE-NRE (nas abcissas, MJ) e GWP (nas ordenadas, kg CO<sub>2</sub> eq) para as argamassas produzidas em laboratório e onde cada ponto corresponde à condutibilidade térmica (W/m.°C)



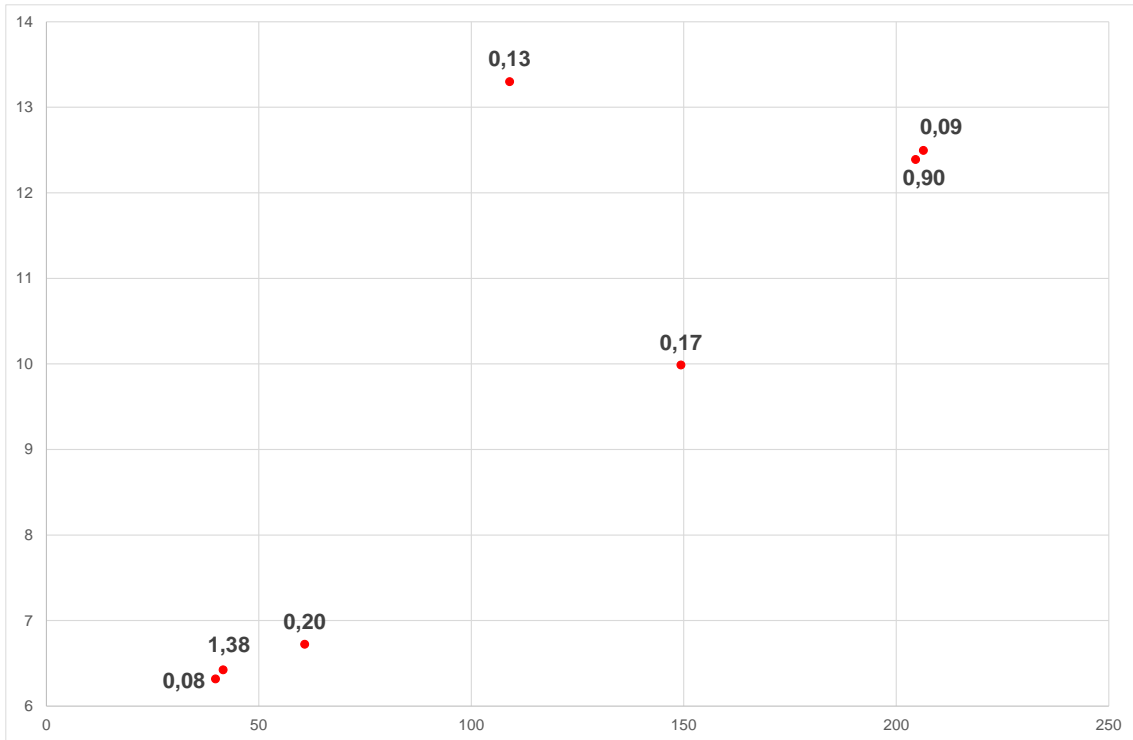


Figura 5.8. PE-NRE (nas abcissas, MJ) e GWP (nas ordenadas, kg CO<sub>2</sub> eq) para as argamassas com menor impacto ambiental produzidas em laboratório e onde cada ponto corresponde à respetiva condutibilidade térmica (W/m.°C)

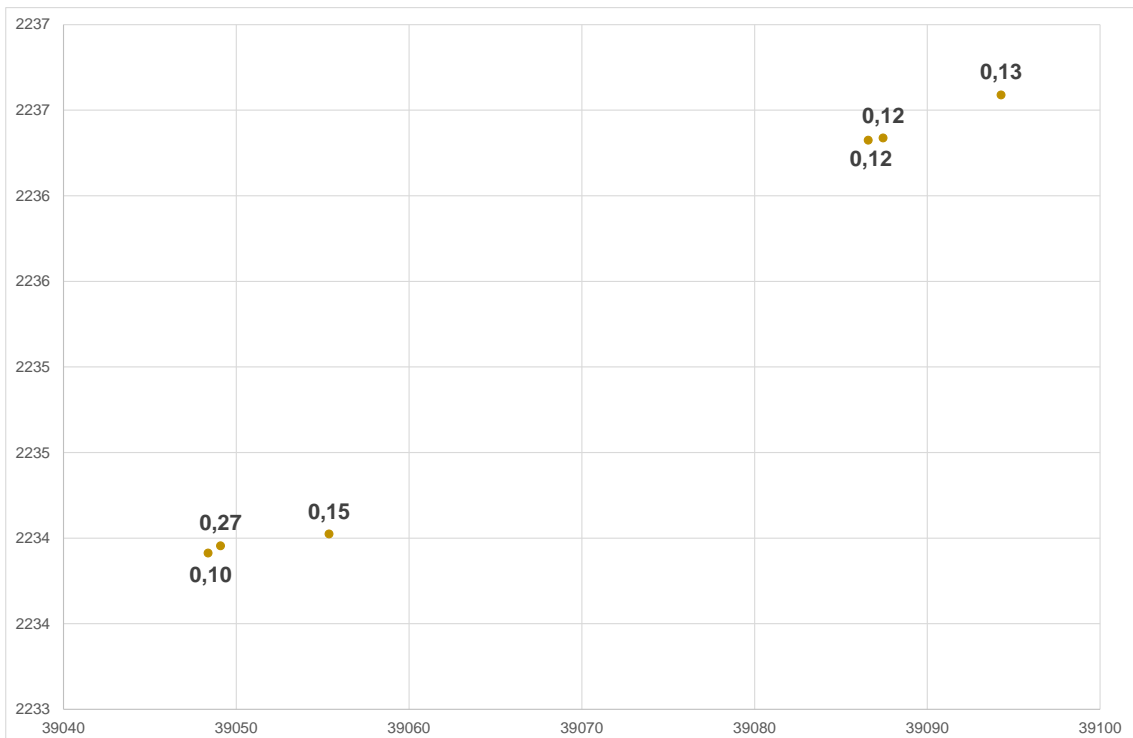


Figura 5.9. PE-NRE (nas abcissas, MJ) e GWP (nas ordenadas, kg CO<sub>2</sub> eq) para as argamassas com maior impacto ambiental produzidas em laboratório e onde cada ponto corresponde à respetiva condutibilidade térmica (W/m.°C)

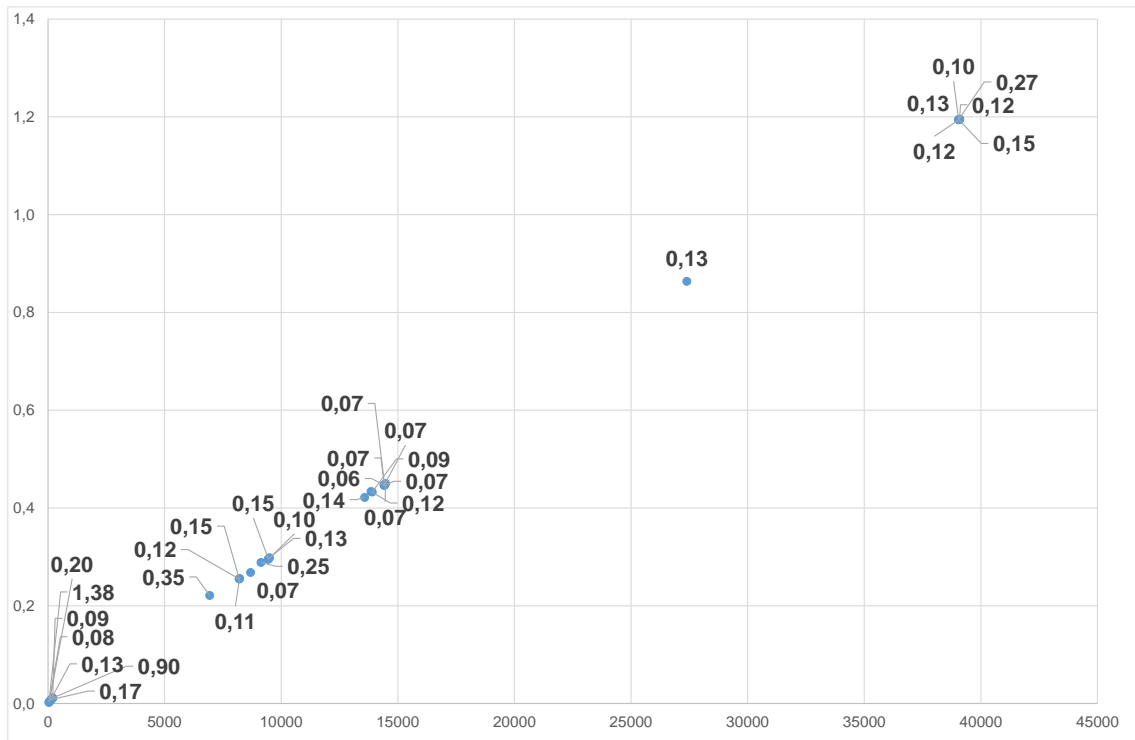


Figura 5.10. PE-NRE (nas abcissas, MJ) e EP (nas ordenadas, kg PO<sub>4</sub><sup>3-</sup> eq) para as argamassas produzidas em laboratório e onde cada ponto corresponde à condutibilidade térmica (W/m.°C)

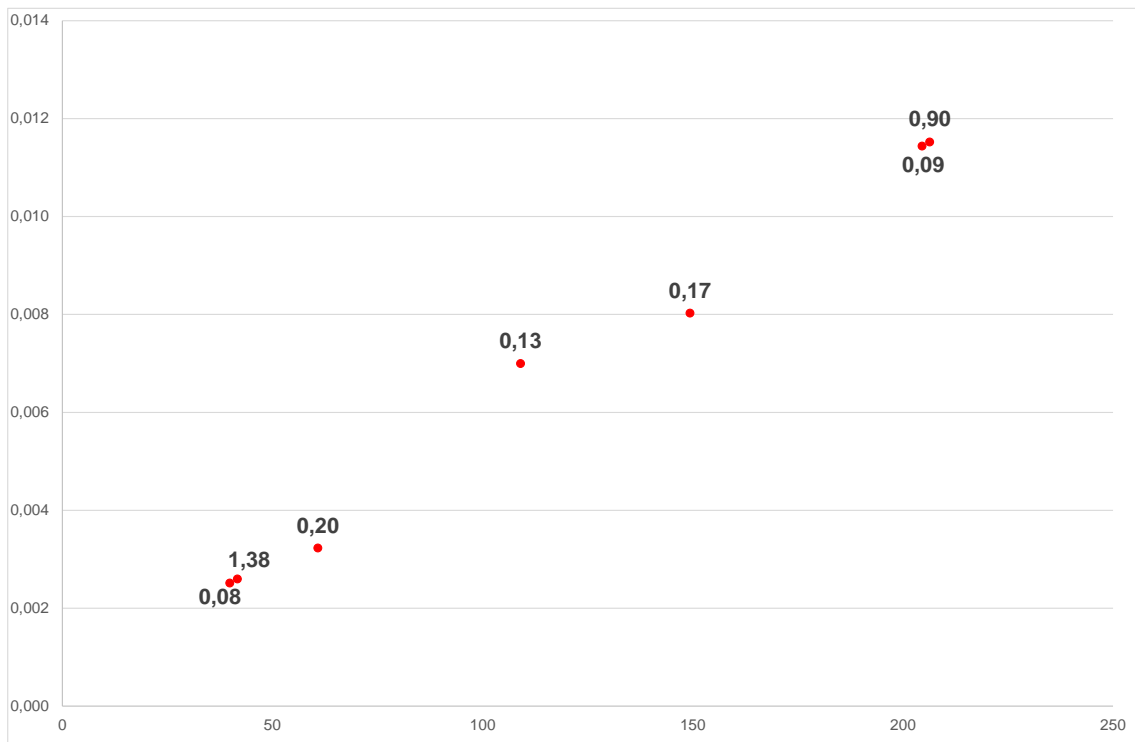


Figura 5.11. PE-NRE (nas abcissas, MJ) e EP (nas ordenadas, kg PO<sub>4</sub><sup>3-</sup> eq) para as argamassas com menor impacto ambiental produzidas em laboratório e onde cada ponto corresponde à respetiva condutibilidade térmica (W/m.°C)

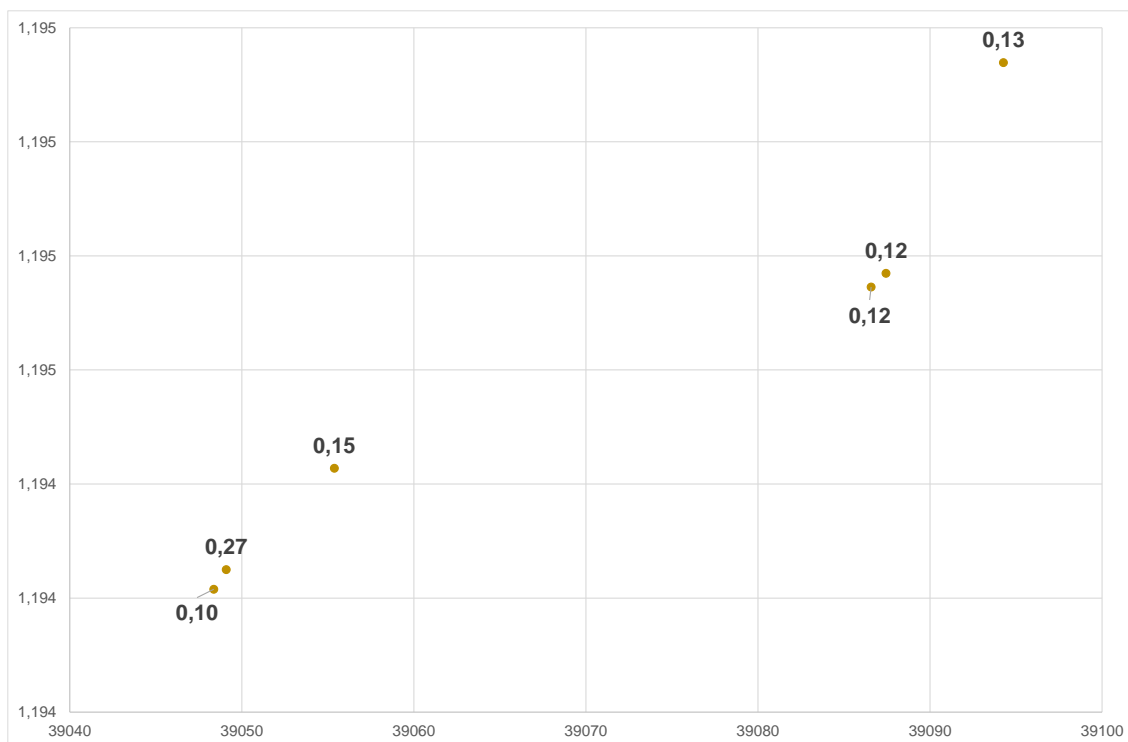


Figura 5.12. PE-NRE (nas abscissas, MJ) e EP (nas ordenadas, kg PO<sub>4</sub><sup>3-</sup> eq) para as argamassas com maior impacto ambiental produzidas em laboratório e onde cada ponto corresponde à respectiva condutibilidade térmica (W/m.°C)

As argamassas que apresentam uma melhor condutibilidade térmica (0,07 W/m.°C) têm impactes ambientais para o EP médios, como é o caso das argamassas #14 à #20 (Figura 5.10). Nesta categoria de impacte, a argamassa #5 é aquela que apresenta uma melhor relação entre o desempenho térmico e ambiental. Por sua vez, as argamassas #1 e #2 apresentam o pior desempenho térmico mas têm impactes ambientais reduzidos. As argamassas com pior desempenho ambiental apresentam valores na ordem de 0,15 W/m.°C (Figura 5.12).

Com esta análise comparativa é possível obter-se uma estimativa do potencial isolamento térmico fornecido por cada alternativa, lado a lado com os impactes ambientais. Não é possível dizer qual a argamassa que melhor se adequa a uma determinada aplicação, uma vez que existem diferentes pontos de vista. No entanto, a análise permite escolher uma argamassa adequada segundo a preferência de cada decisor (por exemplo, que dê mais importância ao desempenho térmico ou a cada um dos impactes ambientais).

## 6. Conclusões e desenvolvimentos futuros

Esta dissertação está inserida no projeto de investigação FCT - PTDC/ECM/118262/2010: *Nanorender - desempenho de argamassas de revestimento*. Este projeto investiga o uso de aerogéis à base de sílica em argamassas de revestimento, obtidos através de secagem subcrítica. Verificou-se neste trabalho que um aerogel subcrítico é, em geral, produzido por meios que consomem menos recursos energéticos, e provocam menos impactes ambientais, relativamente à produção de aerogéis supercríticos.

O desenvolvimento desta dissertação acompanhou o desenvolvimento do projeto de investigação, incluindo todos os avanços e recuos, de modo a se obter uma análise completa de todas as soluções desenvolvidas até ao final deste projeto. Foi necessária uma coordenação entre diferentes áreas de conhecimento para a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), respetiva modelação e utilização do *software* de ACV SimaPro.

O objetivo final desta dissertação foi desenvolver uma Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) ambiental de três versões de um nano material (aerogel) utilizado como agregado em argamassas para revestimento de parede, incidindo na sua fase de produção. Uma análise semelhante ocorreu para as argamassas de desempenho térmico melhorado considerando as várias percentagens desse aerogel que as mesmas podem incorporar. No final, realizou-se uma comparação com o desempenho ambiental e térmico de materiais correntes com a mesma função. Este último ponto não se encontrava planeado desde o início do desenvolvimento desta dissertação. No entanto, esta análise permite dar resposta às diferentes escolhas (relativamente à condutibilidade térmica ou ao impacte ambiental) que diferentes decisores possam ter.

A Avaliação do Ciclo de Vida dos três aerogéis permitiu concluir que, para as fases (A1-A3), o aerogel HYB-A apresenta o menor impacte ambiental em todas as categorias de impacte, seguindo-se HYB-C e o aerogel inorgânico. Estas diferenças devem-se às matérias-primas utilizadas na síntese de cada aerogel e ao tempo de secagem durante a sua produção. No entanto, nas argamassas laboratoriais, optou-se por incorporar em sete delas o aerogel HYB-C por ser, de entre os três, o que apresenta melhores propriedades físicas, nomeadamente no que diz respeito ao controlo da granulometria.

O aerogel inorgânico e o aerogel HYB-C apresentam uma composição que não é semelhante mas, como utilizam o mesmo precursor de sílica (TEOS), têm impactes ambientais idênticos. A matéria-prima que mais impactes ambientais provoca é o TEOS e, não se encontrando no aerogel HYB-A, permite explicar o melhor desempenho ambiental deste aerogel na fase A1.

A quantidade de embalagens utilizadas no produto final (A3.1) é muito reduzida e por isso praticamente não contribui para os impactes deste processo.

Na fase de produção, A3.2, o aerogel HYB-C possui um maior impacte ambiental, seguido do inorgânico e do HYB-A. O aerogel HYB-A necessita de menos tempo de secagem, gastando menos energia, o que faz com que estes impactes sejam menores.

Os dados relacionados com os impactes ambientais dos aerogéis dizem respeito à sua produção em laboratório. Ao se expandir para uma produção à escala industrial, estima-se que estes

valores possam ser reduzidos, embora seja difícil fazer uma estimativa aproximada da escala dessa redução.

Relativamente às argamassas, verificou-se que aquelas que têm aerogel na sua composição apresentam um pior desempenho ambiental. Os valores utilizados para o impacto ambiental das diferentes categorias do aerogel industrial foram calculados com base na média dos valores dos impactos dos aerogéis produzidos em laboratório, o que condicionou o desempenho ambiental das argamassas que incorporam os primeiros.

Por sua vez, as argamassas com melhor desempenho ambiental são aquelas que apresentam agregados leves na sua composição. Estes agregados são um subproduto da indústria e não têm um impacto ambiental significativo associado. Nestas argamassas, a matéria-prima que maiores impactos ambientais provoca é o cimento, com uma contribuição superior a 98%.

Quando comparado o desempenho térmico das argamassas com o respetivo impacto ambiental, verificou-se que, como seria de esperar, a argamassa de referência (#1) constituída por cimento, areia e água, apresenta o pior desempenho térmico ( $\lambda = 1,38 \text{ W/m}\cdot\text{°C}$ ). As argamassas com aerogel incorporado apresentam valores reduzidos de condutibilidade térmica, embora estes não sejam suficientes para garantirem uma boa relação entre impactos ambientais e desempenho térmico. Porém, a argamassa #5 ( $\lambda = 0,08 \text{ W/m}\cdot\text{°C}$ ), constituída por cimento, agregados leves e água, é aquela em que esta relação se torna mais benéfica.

Como desenvolvimento futuro para este estudo, seria interessante realizar uma ACV detalhadas para os aerogéis comerciais, uma vez que os dados utilizados para calcular os impactos ambientais destes aerogéis foram baseados nos resultados da produção dos aerogéis em laboratório, influenciando o resultado do desempenho ambiental das argamassas laboratoriais contendo aerogéis comerciais. Outro aspeto que poderia ser estudado passaria por tentar adaptar a produção das três versões do aerogel e das argamassas produzidas em laboratório para uma escala industrial, obtendo-se uma quantificação mais real dos impactos ambientais resultantes da produção destes materiais.

## Referências

- Ali, Y. (2011)** – “Use of expanded polystyrene in developing solid and hollow block masonry units”. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Universidade Americana no Cairo - Faculdade de Ciências e Engenharia.
- Blengini, G. A. (2006)** – “Life cycle assessment tools for sustainable development: case studies for the mining and construction industries in Italy and Portugal”. Tese de Doutoramento em Engenharia de Minas, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, Portugal.
- BORUCKE, M.; GALLI, A.; IHA, K.; LAZARUS, E.; MATTOON, S.; MORALES, J.C.;**
- BRAGANÇA, M.; PINHEIRO, M.; MATEUS, R. (2013)** – “Portugal SB 2013: Contribution of sustainable building to meet EU 20-20-20 targets”, Guimarães, pp. V-VI.
- BRÁS, A.; LEAL, M.; FARIA, P. (2013)** – “Cement-cork mortars for thermal bridges correction. Comparison with cement-EPS mortars performance”, *Construction and Buildings Materials* 49, pp. 315-327.
- BRUNTLAND, G. (1987)** - “Our common future”. *United Nations Report of the world commission on environment and development*, Oxford University Press, pp. 398.
- COMISSÃO EUROPEIA (2014)** – “Livro verde: Um quadro para as políticas de clima e de energia em 2030”, Bruxelas.
- DEGANI, Clarice M.; CARDOSO, Francisco F. (2002)** – “A sustentabilidade ao longo do ciclo de vida de edifícios: a importância da etapa do projeto arquitetónico.”, NUTAU 2002 – Sustentabilidade, Arquitetura e Desenho Urbano. Núcleo de Pesquisa em Tecnologia da Arquitetura e Urbanismo da Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo.
- DOWSON, M.; GROGAN, M.; BIRKS, T.; HARRISON, D.; CRAIG S. (2012)** – “Streamlined life cycle assessment of transparent silica aerogel made by supercritical drying” *Applied Energy* 97, pp. 396-404.
- FERRÃO, P., (2009)**– “Ecologia Industrial – Princípios e Ferramentas” – IST Press. Lisboa, Portugal.
- FERREIRA, J.V. (2004)** – “Análise do ciclo de vida do produto” – Instituto Politécnico de Viseu, Portugal
- FLORES-COLEN, I.; SOARES, A.; BRITO, J. (2013)** – “A Nanotecnologia aplicada às argamassas de revestimento”, *Revista Internacional Tech ITT* n.º 34, vol. 11, pp. 42-51.
- FRADE, D.; TADEU, A.; TORRES, I.; MENDES, P.; SIMÕES, N.; MATIAS, G.; NEVES, A. (2012)** - “Argamassas industriais com incorporação de granulado de cortiça”, 4º Congresso Português de Argamassas e ETICS, Coimbra, pp. 1-12.
- GARRIDO, R. (2015)** – “Avaliação económica do ciclo de vida de argamassas de desempenho térmico melhorado”. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico, Lisboa
- GOEDKOOP, M.; OELE, M.; LEIJTING, J.; PONSIOEN, T.; MEIJER, E., (2013)** – “Introduction to LCA with SimaPro” – Pré Consultants, Amersfoort, Holanda
- GONÇALVES, P.; FRADE, D.; BRITES, J. (2012)** – “Argamassas Térmicas: Uma solução no cumprimento do RCCTE”, em 4º Congresso Português de Argamassas e ETICS, Coimbra, pp.1-10.
- INSTITUTO NACIONAL DE ESTATÍSTICA, I.P. (2014)** – “Estatística de construção e habitação”.
- JÚLIO, M.; ILHARCO, L.** - “Superhydrophobic hybrid aerogel powders from waterglass with distinctive applications”. *Microporous and Mesoporous Materials*, V. 199, 2014, pp. 29-39.
- SOARES, A; JÚLIO, M.; FLORES-COLEN, I.; ILHARCO, L.; de BRITO, J.; MARTINHO, J. G. -**

“Water-resistance of mortars with lightweight aggregates”, *Key Engineering Materials*, V. 634, 2015 (online since Dec 2014), pp. 46-53.

**LAMBERTINI, M. (2014)** - “*Living Planet Report 2014. Species and spaces, people and places*”.

**LASVAUX, S.; LEROY, Y.; BRIQUET, C.; CHEVALIER, J. (2013)** – “*International survey on critical review and verification practices in LCA with a focus in the construction sector*”, *The 6<sup>th</sup> International Conference on Life Cycle Management in Gothenburg*, pp. 81-84.

**MARTINS, M. (2010)** – “Comportamento físico de argamassas de reboco com regranulado negro de cortiça”. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico, Lisboa.

**MELO, H. (2014)** – “Caracterização experimental do comportamento físico de argamassas de desempenho térmico melhorado”. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico, Lisboa.

**PARGANA, N. (2012)** – “*Environmental impacts of the life cycle of thermal insulation materials of buildings*” - Dissertação de Mestrado em Engenharia do Ambiente, Instituto Superior Técnico, Lisboa.

**PAULSEN, J. (2001)** – “*Life Cycle Assessment of Building Products – The significance of the use phase*” – *Royal Institute of Technology*, Estocolmo, Suécia

**PIMENTEL, D.; PIMENTEL, M. (2006)** – “*Global environmental resources versus world population growth*”, *Ecological Economics* 59, pp. 195-198.

**PINHEIRO, M. D. (2006)** - “Ambiente e construção sustentável”. Instituto do Ambiente, Amadora

**PIRES, C.; BRAGANÇA, L.; MATEUS, R. (2012)** – “*Guidelines for sustainable refurbishment of residential buildings*”, *Proceedings of the 1<sup>st</sup> International Conference on Building sustainability assessment*, pp. 301-311.

**POBLETE, P.; WACKERNAGEL, M. (2012)** - *Global Footprint Network, 2013. The National Footprint Accounts, 2012 edition. Global Footprint Network, Oakland, CA, USA.*

**SECIL, Ecocork (2013)** - Patente PT 105937 - “Argamassa leve preparada com granulado de cortiça”.

**SILVESTRE, J.D. (2012)** - “*Life cycle assessment “from cradle to cradle” of building assemblies – application to external walls*”. Tese de Doutoramento em Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico, Lisboa.

**SILVESTRE, J.D.; BRITO, J.; PINHEIRO, M. (2013)** - “Environmental, economic and energy (3E) performance of construction materials with cork for energy renovation of the buildings envelope”. Relatório ICIST EP n.º 27/2013, Relatório FUNDEC PS n.º 30/2013, Instituto Superior Técnico, Lisboa.

**SOARES, A.; FLORES-COLEN, I.; BRITO, J. (2014)** – “*Nanorenders on buildings facades: technical, economic and environmental performance*”, *XIII International conference on durability of building materials*.

**SOARES, A; JÚLIO, M.; FLORES-COLEN, I.; ILHARCO, L.; de BRITO, J.; MARTINHO, J. G. -** “*Water-resistance of mortars with lightweight aggregates*”, *Key Engineering Materials*, V. 634, 2015 (online since Dec 2014), pp. 46-53.

**STAHL, Th.; BRUNNER, S.; ZIMMERMANN, M.; GHAZI WAKILI, K. (2012)** – “*Thermo-hygric properties of a newly developed aerogel based insulation rendering for both exterior and interior applications*”. *Energy and Buildings* 44, pp. 114-117.

**VALE, H. (2014)** – “Caracterização experimental do comportamento mecânico de argamassas de desempenho térmico melhorado”. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico, Lisboa.

#### **Páginas da internet consultadas**

**[W1]** ASSOCIAÇÃO PORTUGUESA DE FABRICANTES DE ARGAMASSAS (APFAC). <http://www.apfac.pt/layout.asp?area=3000>; 12/09/2014

**[W2]** WEBER. [http://www.weber.com.pt/uploads/media/FT\\_weber.therm\\_aislone\\_PT.pdf](http://www.weber.com.pt/uploads/media/FT_weber.therm_aislone_PT.pdf)

**[W3]** SECIL ARGAMASSAS. <http://www.secilargamassas.pt/pt/produtos-20121220-181446/argamassas-tecnicas/isolamento-termico-projectado/isodur>

**[W4]** DIASEN, DIATHONITE EVOLUTION. <https://www.diasen.com/sp/en/p/diathonite-evolution.3sp>

**[W5]** SECIL ARGAMASSAS. <http://www.secilargamassas.pt/pt/produtos-20121220-181446/solucoes-para-revestimentos/rebocos-rhp-20121225-212508/rhp-ecocork>

**[W6]** FIXIT AEROGEL INSULATING PLASTER SYSTEM – HANDLING GUIDELINES. [http://www.fixit.ch/aerogel/pdf/Fixit\\_222\\_Aerogel\\_Verarbeitungsrichtlinien\\_A4\\_EN.pdf](http://www.fixit.ch/aerogel/pdf/Fixit_222_Aerogel_Verarbeitungsrichtlinien_A4_EN.pdf)

#### **Normalização consultada**

**NP EN ISO 14040:2006** – Gestão ambiental – Avaliação do ciclo de vida – Princípios e enquadramento, Instituto Português da Qualidade – Monte da Caparica.

**NP EN ISO 14044:2006** – Gestão ambiental – Avaliação do ciclo de vida – Requisitos e linhas de orientação, Instituto Português da Qualidade – Monte da Caparica.

**NP EN 15643-2:2013** - Sustentabilidade das obras de construção - Avaliação da sustentabilidade dos edifícios - Parte 2: Enquadramento para a avaliação do desempenho ambiental.

**CEN (2010)** – “*Specification for mortar for masonry – Part 1: Rendering and plastering mortar*”. EN 998- 1. Brussels: Comité Européen de Normalisation.