



REPÚBLICA  
PORTUGUESA



**IPL**

escola superior de tecnologia e gestão  
instituto politécnico de leiria

# **Avaliação do Ciclo de Vida da Cristobalite**

Projeto

Mestrado em Engenharia da Energia e do Ambiente

André David Filipe

Leiria, setembro de 2025



REPÚBLICA  
PORTUGUESA



**IPL**

escola superior de tecnologia e gestão  
instituto politécnico de leiria

# **Avaliação do Ciclo de Vida da Cristobalite**

Projeto

Mestrado em Engenharia da Energia e do Ambiente

André David Filipe

Trabalho de Projeto realizado sob a orientação do Professor Doutor Nelson Simões Oliveira.

Leiria, setembro de 2025

# **Originalidade e Direitos de Autor**

O presente relatório de projeto é original, elaborado unicamente para este fim, tendo sido devidamente citados todos os autores cujos estudos e publicações contribuíram para o elaborar.

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição de que sejam mencionados os Autores e feita referência ao ciclo de estudos no âmbito do qual o mesmo foi realizado, a saber, Curso de Mestrado em Engenharia da Energia e do Ambiente, no ano letivo 2024/2025, da Escola Superior de Tecnologia e Gestão do Instituto Politécnico de Leiria, Portugal, e, bem assim, à data das provas públicas que visaram a avaliação destes trabalhos.

# Dedicatória

Dedico este projeto a todos os profissionais na área da Qualidade, Ambiente, Segurança e Energia que se dedicam para aprofundar o seu conhecimento e alargar os seus horizontes.

"Ninguém que é curioso é idiota. As pessoas que não fazem perguntas permanecem ignorantes para o resto de suas vidas."

Neil DeGrasse Tyson

# Agradecimentos

Em primeiro lugar gostaria de agradecer ao Professor Nelson S. Oliveira, orientador deste projeto, é membro integrado do LSRE-LCM – Laboratório de Processos de Separação e Reacção - Laboratório de Catálise e Materiais, suportado por fundos nacionais através da FCT/MCTES (PIDDAC): LSRE-LCM, UIDB/50020/2020 (DOI: 10.54499/UIDP/50020/2020) e UIDB/50020/2020 (DOI: 10.54499/UIDP/50020/2020); e ALiCE, LA/P/0045/2020 (DOI: 10.54499/LA/P/0045/2020), por me ter dado a oportunidade de aprofundar este tema inovador e por toda a ajuda ao longo da elaboração deste projeto.

Gostara de agradecer aos meus pais, irmã e avó por tudo o que fizeram por mim e por toda a compreensão que tiveram ao longo de todo o curso, por todo o apoio ao longo destes anos.

Gostaria ainda de agradecer aos colegas que se tornaram muito mais que isso principalmente à Daniela, à Delfina, ao Humberto e ao Joaquim. Gostaria também de agradecer a todos os meus colegas e professores ao longo do curso.

Gostaria também de agradecer a todas os profissionais da SIFUCEL – Sílicas, S.A. em especial ao Manuel Pinheiro e Gonçalo Pinheiro, e também às restantes pessoas do Grupo Parapedra.

Por fim gostaria de agradecer à Daniela Silva por todos os “tem calma” dos últimos tempos e por todo o apoio e força que me deu nos últimos meses.



# Resumo

O presente trabalho desenvolve uma Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) da cristobalite, de acordo com as normas internacionais ISO 14040:2006 e ISO 14044:2006, com o objetivo de identificar e quantificar os potenciais impactos ambientais associados à sua produção. A unidade funcional considerada corresponde a 1 kg de cristobalite seca pronta para expedição, numa abordagem cradle-to-gate, abrangendo as etapas de extração, lavagem, classificação da areia siliciosa especial, processos de calcinação no forno rotativo industrial, consumos energéticos e fluxos residuais.

A avaliação foi realizada com recurso à metodologia Environmental Footprint 3.1, utilizando o software SimaPro e bases de dados secundárias (Ecoinvent 3.11), sempre que dados primários não estavam disponíveis. Os resultados foram normalizados em Pessoa Equivalente (PEq), permitindo identificar e priorizar as categorias de impacto mais relevantes.

As análises evidenciaram que a produção de calor por combustão de gás natural no processo de calcinação é responsável por mais de 98% dos impactos nas categorias de Alterações Climáticas, Utilização de Recursos Fósseis e Formação Fotoquímica de Ozono, constituindo o principal vetor de pressão ambiental. Adicionalmente, verificaram-se contributos significativos em Toxicidade Humana (cancerígenos) e Ecotoxicidade em água doce, relacionados com emissões gasosas, resíduos sólidos e efluentes provenientes da extração e da transformação mineral.

Este trabalho contribui para a literatura científica ao disponibilizar inventários e resultados específicos da realidade industrial portuguesa, reforçando a importância da integração da ACV como ferramenta de apoio à decisão na indústria mineral e cerâmica. Os resultados sustentam o alinhamento da produção de cristobalite com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS 7, 9, 12 e 13) e fornecem uma base sólida para a definição de estratégias de economia circular e de neutralidade carbónica no setor.

**Palavras-chave:** Cristobalite, Avaliação do Ciclo de Vida, Sustentabilidade, Areia siliciosa especial.



# Abstract

This work develops a Life Cycle Assessment (LCA) of cristobalite, in accordance with the international standards ISO 14040:2006 and ISO 14044:2006, with the aim of identifying and quantifying the potential environmental impacts associated with its production. The functional unit considered corresponds to 1 kg of dry cristobalite ready for dispatch, under a cradle-to-gate approach, covering the stages of extraction, washing, and classification of special silica sand, calcination in an industrial rotary kiln, energy consumption, and residual flows.

The assessment was carried out using the Environmental Footprint 3.1 methodology, with the support of SimaPro software and secondary databases (Ecoinvent 3.11) whenever primary data were not available. The results were normalized into Person Equivalent (PEq), enabling the identification and prioritization of the most relevant impact categories.

The analyses showed that heat production from natural gas combustion in the calcination process is responsible for over 98% of the impacts in the categories of Climate Change, Fossil Resource Use, and Photochemical Ozone Formation, representing the main environmental pressure point. In addition, significant contributions were observed in Human Toxicity (carcinogenic) and Freshwater Ecotoxicity, associated with gaseous emissions, solid waste, and effluents from extraction and mineral processing.

This study contributes to the scientific literature by providing inventories and results specific to the Portuguese industrial context, reinforcing the importance of integrating LCA as a decision-support tool in the mineral and ceramic industries. The results support the alignment of cristobalite production with the Sustainable Development Goals (SDGs 7, 9, 12, and 13) and provide a solid basis for defining circular economy and carbon neutrality strategies in the sector.

**Keywords:** Cristobalite, Life Cycle Assessment, Sustainability, Special silica sand



# Índice

<b>1. Introdução .....</b>	<b>1</b>
<b>1.1. Enquadramento do Tema .....</b>	<b>1</b>
<b>1.2. Objetivos e Âmbito do Trabalho.....</b>	<b>3</b>
<b>1.3. Organização do Projeto.....</b>	<b>4</b>
<b>2. Estado da Arte .....</b>	<b>5</b>
<b>2.1. Cristobalite .....</b>	<b>6</b>
2.1.1. Indústria extrativa de areias especiais .....	6
2.1.2. Processo de fabrico .....	7
<b>2.2. Avaliação do Ciclo de Vida .....</b>	<b>10</b>
<b>3. Produção de cristobalite.....</b>	<b>18</b>
<b>3.1. Caracterização geográfica e geológica.....</b>	<b>18</b>
3.1.1. Descrição Geológica Regional .....	19
3.1.2. Descrição do depósito mineral .....	20
<b>3.2. Caso de Estudo.....</b>	<b>20</b>
<b>3.3. Cristobalite vs areia siliciosa .....</b>	<b>23</b>
<b>4. Avaliação do ciclo de vida da cristobalite.....</b>	<b>26</b>
<b>4.1. Objetivos e Âmbito .....</b>	<b>26</b>
<b>4.2. Inventário do Ciclo de Vida da Cristobalite .....</b>	<b>28</b>
<b>4.3. Avaliação do Inventário do Ciclo de Vida.....</b>	<b>30</b>
<b>4.4. Avaliação de impacte do ciclo de vida .....</b>	<b>36</b>
4.4.1. Análise e discussão dos resultados .....	46
<b>5. Conclusões .....</b>	<b>51</b>
<b>5.1. Desenvolvimentos futuros .....</b>	<b>52</b>
<b>Referências Bibliográficas .....</b>	<b>54</b>
<b>Anexos.....</b>	<b>57</b>
<b>Anexo A - Resultados de Normalização.....</b>	<b>57</b>

<b>Anexo B - Tabelas com a apresentação dos resultados de caracterização.....</b>	<b>59</b>
<b>Anexo C - Gráfico com a apresentação dos resultados de caracterização.....</b>	<b>61</b>

# Lista de Figuras

Figura 1.1 - Previsão do mercado da cristobalite (Data Bridge Market, 2024). .....	2
Figura 2.1 - Esquema de produção da cristobalite (Grenzebach Group, 2025). .....	8
Figura 3.1 - Extrato da Carta Militar de Portugal à de escala 1:250 000, folha n.º 5, do IGE. ....	18
Figura 3.2 – Adaptado de Zbyszewski & Moitinho de Almeida (1960) Enquadramento geológico da "Bacia de Rio Maior", baseado na Carta Geológica de Portugal, escala 1/50 000, Folhas 26D. ....	19
Figura 3.3 - Lagoa da mina Via-Vai - SIFUCEL. ....	21
Figura 3.4 - Forno de Cristobalite da SIFUCEL em Rio Maior. ....	22
Figura 3.5 - Diferentes produtos do Grupo Parapedra (Grupo Parapedra, 2025). ....	24
Figura 3.6 - OCS Powder Tester (PT2C) (OCS Optical Control Systems GmbH, 2025). ....	25
Figura 4.1 - Fluxograma da produção de cristobalite com a definição da fronteira do sistema em estudo. ....	29
Figura 4.2 - Resultados de Normalização das categorias de impacte ambiental pela metodologia Environmental Footprint, apenas para comparação entre as várias categorias. ....	39
Figura C.1 - Resultados das categorias de impacte ambiental pela metodologia Environmental Footprint 3.1. ....	61

# Lista de tabelas

Tabela 3.1 - Polimorfos da sílica cristalina (Key-Schwartz et al., 2003).....	23
Tabela 4.1 - Inventário do processo de extração de areia para 1 kg de cristobalite. ....	31
Tabela 4.2 - Inventário do processo de lavagem de areia para a produção de 1 kg de cristobalite. ....	32
Tabela 4.3 - Inventário do processo de processo de conversão em 1 kg cristobalite. ....	36
Tabela 4.4 - Utilização de recursos fósseis (>0,2%). ....	39
Tabela 4.5 - Alterações climáticas - total (>0,2%).....	40
Tabela 4.6 - Formação fotoquímica de ozono - saúde humana (>0,2%).....	41
Tabela 4.7 - Ponderação das substâncias poluentes na produção de cristobalite (>1%). ....	42
Tabela 4.8 - Toxicidade humana, cancerígenos – total (>0,2%).....	43
Tabela 4.9 - Ponderação das substâncias poluentes na produção de cristobalite (>1%). ....	43
Tabela 4.10 - Ecotoxicidade, água doce (>0,2%).....	45
Tabela 4.11 - Ponderação das substâncias poluentes na produção de cristobalite (>1%). ....	45
Tabela 4.12 - Impacte climático de vários tipos de produção/alternativas de areia. ....	49
Tabela A.1 - Resultados da produção de cristobalite (normalizados). ....	57
Tabela A.2 - Resultados da produção de cristobalite (normalizados) (cont). ....	58
Tabela B.1 - Resultados da produção de cristobalite. ....	59
Tabela B.2 - Resultados da produção de cristobalite (cont.). ....	60

## Lista de siglas e acrónimos

ACV	Avaliação do Ciclo de Vida
AICV	Avaliação de impacto do ciclo de vida
CAGR	Taxa de Crescimento Anual Composta
CCV	Custos do Ciclo de Vida
CDR	Combustível Derivado de Resíduos
EDIP	Environmental Development of Industrial Products
EGR	Recirculação dos gases de escape
ELCD	European Life Cycle Database
ESTG	Escola Superior de Tecnologia e Gestão
GEE	Gases com efeito de estufa
GPL	Gases de petróleo liquefeito
IARC	Agência Internacional para a investigação em cancro
ICV	Inventário do ciclo de vida
LCA	Life Cycle Assessment
LCIA	Life Cycle Impact Assessment
NMVOC	Compostos orgânicos voláteis não metânicos
ODS	Objetivos de Desenvolvimento Sustentável
OPCM	Materiais de cimento Portland convencional
PA	Potencial de Acidificação
PAG	Potencial de Aquecimento Global
PDCO	Potencial de Depleção da Camada de Ozono
PDRA-E	Potencial de Depleção de Recursos Abióticos
PE	Potencial de Eutrofização
PEq	Pessoa Equivalente
PESTLE	Política, Económica, Social e Tecnológica
POF	Potencial de Formação de Ozono Fotoquímico
PTH	Potencial de Toxicidade Humana
RCD	Resíduos de construção e demolição
SCMs	Materiais cimentícios suplementares
SCR	Redução Seletiva Catalítica

SNCR	Redução Não-Catalítica Seletiva
XRF	Fluorescência de raios-X

# 1. Introdução

Este capítulo introdutório apresenta o enquadramento geral da cristobalite enquanto produto de interesse industrial, nomeadamente no contexto da sua produção e aplicações. Aborda-se a relevância da Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) como ferramenta metodológica para quantificar os impactos ambientais associados à produção da cristobalite. Expõem-se, de forma concisa, os objetivos centrais do presente trabalho, com destaque para a análise de alternativas sustentáveis. Por fim, descreve-se a estrutura do documento, clarificando a organização dos conteúdos desenvolvidos nos capítulos subsequentes.

## 1.1. Enquadramento do Tema

A cristobalite é uma forma polimórfica de sílica ( $\text{SiO}_2$ ), amplamente utilizada nos setores industriais como pedra artificial (marmocompactos), tintas, cerâmica, vidro e revestimentos, devido às suas propriedades mecânicas e térmicas únicas. No entanto, a produção e a utilização desta matéria-prima levantam questões ambientais e económicas relacionadas com o consumo de recursos naturais, emissões com potenciais impactos ambientais, e produção de resíduos (Ashutosh, 2015; Errington et al., 2022).

No panorama a nível mundial, empresas como a C.E.D. Process Minerals (EUA), GoldStar Powders (EUA), Momentive Performance Materials (EUA), Terengganu Sílica (Malásia), Hoben International Limited (Reino Unido), Jinyu Advanced Materials Corp. (China), e Tosoh Corporation (Japão) lideram a produção global, adotando soluções tecnológicas para corresponder às necessidades crescentes da indústria (Deutscher Medien Verlag GmbH, 2025).

A nível europeu, destacam-se outras empresas relevantes, como a Quarzwerke, na Alemanha, Silmer na Itália, e a Sibelco, na Suíça, Bélgica e Espanha, que operam com processos tecnologicamente evoluídos.

Em Portugal deu-se início à produção industrial de cristobalite em 2021, através da empresa SIFUCEL – Sílicas, S.A., posicionando-se como pioneiro a nível nacional. A empresa tem investido em tecnologias avançadas com o objetivo de minimizar os impactos ambientais do processo produtivo e otimizar a sua eficiência.

A produção de cristobalite tem evoluído no sentido da tecnologia empregue. O aumento da eficiência energética das instalações e dos equipamentos, fontes de energia alternativas são medidas que estão a ser consideradas como prioritárias no desenvolvimento sustentável da indústria. Estes desenvolvimentos refletem uma tendência de modernização do setor, mas também sublinham a importância de integrar critérios de sustentabilidade e de avaliação dos impactos socioambientais ao longo de toda a cadeia de valor da cristobalite (PitchBook, 2025). A figura 1.1 apresenta a previsão de consumo de cristobalite entre 2021 e 2028.

Em Dezembro de 2024, de acordo com o relatório da Data Bridge Market Research sobre análise do tamanho, quota e tendências do mercado global de Cristobalite, o mercado global de cristobalite foi avaliado em 42,50 milhões de dólares em 2024 e está projetado para atingir 76,36 milhões de dólares até 2032, com uma Taxa de Crescimento Anual Composta (CAGR) de 7,6% durante o período previsto de 2025 a 2032. Além dos *insights* sobre cenários de mercado, como o valor do mercado, a taxa de crescimento, a segmentação, a cobertura geográfica e os principais participantes, os relatórios de mercado selecionados pela Data Bridge Market Research incluem também a análise de importação e exportação, a visão geral da capacidade de produção, a análise de consumo de produção, análise de tendência de preço, cenário de alterações climáticas, análise da cadeia de abastecimento, análise da cadeia de valor, visão geral das matérias-primas/consumíveis, critérios de seleção de fornecedores, análise Política, Económica, Social e Tecnológica (PESTLE) e análise de Porter (Data Bridge Market, 2024).

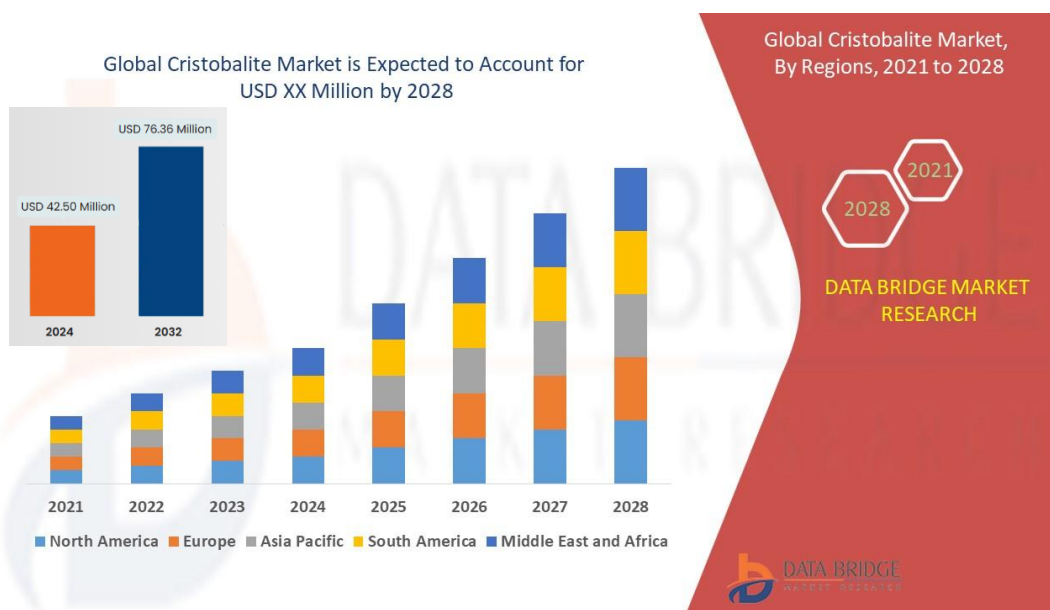


Figura 1.1 - Previsão do mercado da cristobalite (Data Bridge Market, 2024).

À medida que as indústrias continuam a crescer, o mercado da cristobalite está preparado para uma expansão substancial, impulsionado pelos avanços tecnológicos e pela inovação de desenvolvimentos dos equipamentos.

As tecnologias atualmente utilizadas na produção de cristobalite baseiam-se em métodos convencionais, tais como fornos rotativos ou estáticos de alta temperatura de tratamento térmico. Contudo, têm vindo a emergir desenvolvimentos que refletem uma tendência de modernização do setor, nomeadamente através da otimização energética dos fornos, integração de fontes renováveis ou aplicação de ferramentas digitais para controlo de processo. Embora estas tecnologias apresentem uma eficiência comprovada, a sua maturidade tecnológica contrasta com os requisitos da descarbonização industrial atual. Os processos continuam a depender fortemente de fontes de energia fóssil, e os esforços de inovação têm sido limitados à otimização de rendimentos térmicos e ao controlo da granulometria e pureza do produto final (Grenzebach Group, 2025).

Apesar da introdução de sistemas de recuperação de calor e melhoria da eficiência térmica em algumas unidades industriais, não se verifica, até à data, uma transição significativa para tecnologias de baixo carbono, como a eletrificação com fontes renováveis ou a integração de hidrogénio verde como vetor energético. Esta limitação tecnológica representa um desafio à competitividade futura do setor, particularmente num contexto europeu marcado por metas climáticas ambiciosas.

A cristobalite encontra concorrência direta em outros materiais silicatados, sendo o quartzo a alternativa mais evidente. Ambos apresentam propriedades térmicas semelhantes, como elevada estabilidade química e resistência ao choque térmico, sendo utilizados em revestimentos, abrasivos, cerâmicas técnicas e compósitos poliméricos. No entanto, a cristobalite apresenta coeficientes de dilatação térmica ligeiramente superiores, o que a torna mais adequada para aplicações que exigem resistência a ciclos térmicos repetitivos (Associação Brasileira de Cerâmica – ABCERAM, 2025).

Outros possíveis substitutos incluem a tridimite (outra forma polimórfica da sílica), a wollastonite ( $\text{CaSiO}_3$ ), a alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) e certos tipos de feldspato ou talco, dependendo da aplicação específica. Estes materiais podem apresentar vantagens em termos de custo, disponibilidade ou propriedades mecânicas, mas frequentemente comprometem a performance térmica ou a compatibilidade química com certas matrizes.

A substituição da cristobalite depende, portanto, de múltiplos fatores, incluindo as exigências funcionais da aplicação final, os custos de processamento, os requisitos legais e o perfil ambiental do material alternativo. Neste contexto, torna-se fundamental dispor de ferramentas que permitam comparar de forma objetiva as diferentes opções de produtos, sendo a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) uma metodologia essencial para quantificar e compreender os impactos ambientais associados a cada etapa do ciclo de vida da cristobalite, desde a extração da matéria-prima até ao destino final ou reciclagem. Esse estudo é crucial para identificar as oportunidades de mitigação dos impactos, propor soluções mais sustentáveis e alinhar a produção da cristobalite às metas globais de sustentabilidade e economia circular (Soares et al., 2023).

Dessa forma, este trabalho irá contribuir para o avanço da literatura científica, ao mesmo tempo que fornece uma base sólida para decisões estratégicas nas indústrias que dependem da cristobalite, promovendo práticas mais responsáveis e ambientalmente conscientes.

## 1.2. Objetivos e Âmbito do Trabalho

O objetivo geral deste trabalho é realizar a ACV da cristobalite baseada nas normas ISO 14040:2006 e 14044:2006, com o intuito de identificar e quantificar os potenciais impactos ambientais associados à sua produção. Pretende-se, ainda, avaliar o desempenho ambiental da cristobalite no seu ciclo de vida, identificar as etapas mais impactantes e propor medidas de mitigação que possam promover a adoção de práticas mais sustentáveis para a indústria extrativa.

Os objetivos específicos incluem:

Analisar o processo de produção da cristobalite, considerando a extração da matéria-prima, o processamento/transformação, do berço ao portão “*cradle-to-gate*”, com a avaliação dos impactes associados à obtenção dos recursos necessários para a produção da cristobalite.

Identificar os principais impactes ambientais associados às etapas do ciclo de vida da cristobalite, incluindo o processo industrial com as emissões gasosas e líquidas, consumo de recursos e produção de resíduos, através da investigação do processo industrial, incluindo consumo energético e emissões associadas.

### **1.3. Organização do Projeto**

Este trabalho está estruturado em 5 capítulos, organizados de forma a garantir uma abordagem lógica e progressiva sobre a ACV da cristobalite.

**Capítulo 1** – Introdução: Apresenta o enquadramento do tema da cristobalite, os objetivos do estudo e o seu âmbito, além de descrever a organização do projeto.

**Capítulo 2** – Estado da Arte: Explora os conceitos fundamentais para o estudo, incluindo a caracterização da cristobalite, as suas aplicações industriais e impactes ambientais. Também discute a metodologia da ACV, as normas internacionais associadas e exemplos de estudos semelhantes.

**Capítulo 3** – Metodologia: Detalha a abordagem adotada para a realização da ACV, incluindo a definição do sistema de estudo, os dados utilizados, as hipóteses assumidas e o software utilizado.

**Capítulo 4** – Resultados e Discussão: Apresentação dos resultados da ACV, identificando os principais impactes ambientais ao longo do ciclo de vida da cristobalite *cradle-to-gate* e discutindo possíveis melhorias e estratégias sustentáveis.

**Capítulo 5** – Conclusão do estudo efetuado, destacando as principais conclusões, maiores dificuldades desta matéria-prima e recomendações para futuras investigações ou ações para o setor.

Com esta organização, pretende-se garantir uma abordagem clara e estruturada que permite compreender a relevância deste estudo e as suas contribuições para a sustentabilidade da produção e uso da cristobalite.

## 2. Estado da Arte

Este capítulo tem como objetivo apresentar o estado da arte relativo à produção da cristobalite, fornecendo o enquadramento técnico-científico necessário para a compreensão dos seus impactes ambientais ao longo do ciclo de vida do produto. Serão abordadas as principais tecnologias de produção, as suas aplicações industriais mais relevantes e os avanços recentes no domínio da sustentabilidade.

No contexto da indústria, os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) oferecem um quadro estratégico para orientar práticas mais responsáveis e sustentáveis ao longo das cadeias de valor. A sua implementação é fundamental para mitigar os impactes ambientais e fomentar a inovação tecnológica com menor pegada ecológica.

Os ODS definidos pela Organização das Nações Unidas em 2015, constituem um conjunto de 17 metas globais que visam promover a prosperidade, proteger o ambiente e assegurar o bem-estar das gerações presentes e futuras. Estes objetivos abrangem dimensões económicas, sociais e ambientais do desenvolvimento sustentável, promovendo uma abordagem integrada e equilibrada.

Para a produção da cristobalite consideram-se os seguintes ODS:

### ■ ODS 7 – Energia Acessível e Limpa


Dado que o processo de formação de cristobalite requer temperaturas elevadas, a dependência de energia é crítica. Investigações que proponham a utilização de energias renováveis no processo industrial, ou melhorias na eficiência energética (ex: isolamento térmico de fornos, co-geração), enquadram-se neste objetivo.

### ● ODS 9 – Indústria, Inovação e Infraestruturas

A produção de cristobalite envolve processos industriais com altas temperaturas com elevado consumo de energia. A investigação de métodos mais eficientes, como a utilização de fontes de energia renovável (ex. energia solar, eólica concentrada para calcinação), ou processos de ativação térmica com recuperação de calor, enquadra-se na modernização sustentável da indústria e na promoção da inovação tecnológica.

### ● ODS 12 – Produção e Consumo Sustentáveis

A produção convencional de cristobalite pode ter uma pegada ambiental significativa devido ao consumo energético e às emissões de CO<sub>2</sub>. A implementação de tecnologias limpas e de sistemas de economia circular, como a valorização de resíduos siliciosos, contribui diretamente para modos de produção mais sustentáveis.

 ODS 13 – Ação Climática

A redução das emissões de gases com efeito de estufa (GEE) associadas à calcinação da sílica é uma questão central para mitigar os impactos climáticos. Pode ser considerada a substituição de combustíveis fósseis por fontes de energia renováveis nas unidades de produção.

## 2.1. Cristobalite

A cristobalite do ponto de vista estrutural, pode existir em duas fases: a fase tetragonal ( $\beta$ -cristobalite), estável a altas temperaturas, e a fase cúbica ( $\alpha$ -cristobalite), que se forma por transição displaciva durante o arrefecimento. Esta transição é acompanhada por alterações significativas no volume e propriedades mecânicas, o que tem implicações práticas na sua aplicação industrial (Hemley et al., 2019).

A produção industrial de cristobalite é realizada muitas vezes com o auxílio de um aditivo químico, como o hidróxido de sódio (NaOH) ou hidróxido de cálcio ( $\text{Ca(OH)}_2$ ), para acelerar a transformação. O processo de conversão, embora eficiente, é elevado no consumo de energia, o que tem motivado o interesse por alternativas energéticas mais sustentáveis (Grenzebach Group, 2025).

A cristobalite, por norma, é sujeita a etapas adicionais de moagem, crivagem e controlo de qualidade, com o objetivo de assegurar as especificações requeridas para as diferentes aplicações, como enchimentos funcionais em polímeros, cerâmicas técnicas ou pastas dentífricas (Quarzwerke GmbH, 2025).

### 2.1.1. Indústria extrativa de areias especiais

A indústria extrativa de areias especiais desempenha um papel crucial na cadeia de valor da produção de cristobalite, fornecendo a matéria-prima essencial: areia de quartzo de elevada pureza. A extração destas areias ocorre nos depósitos naturais, onde o quartzo é predominantemente presente (> 99%). O processo inicia-se com a remoção mecânica do material, seguindo-se as operações de lavagem e crivagem ou separação granulométrica para obter a granulometria desejada. Posteriormente, a areia é submetida a tratamentos físico-químicos, como separação magnética de alta intensidade e lixiviação ácida ou básica, para eliminar impurezas minerais e metálicas, garantindo a pureza necessária para aplicações industriais exigentes (Long et al., 2024).

A areia purificada é então processada em fornos rotativos. A eficiência desta conversão depende de vários fatores, incluindo a presença de aditivos químicos, o tempo de residência no forno e a taxa de arrefecimento controlado. O produto final, cristobalite de alta pureza.

Devido aos consumos elevados de energia, torna-se necessário incentivar a investigação de métodos mais sustentáveis e eficientes para a produção de cristobalite. Estudos recentes têm explorado o uso de fontes alternativas de sílica, como resíduos industriais - nomeadamente a cinza de casca de arroz ou resíduos de vidro -, bem como a adoção de tecnologias de

processamento mais sustentáveis. Entre essas práticas, destacam-se o co-processamento, que envolve a utilização de resíduos como matérias-primas ou fontes de energia, e a implementação de sistemas de recuperação de calor residual, com o objetivo de reduzir o impacto ambiental associado à produção de cristobalite (Yang et al., 2024).

### 2.1.2. Processo de fabrico

O processo de produção de cristobalite envolve várias etapas técnicas que transformam areia de sílica em cristobalite de alta qualidade. A areia de sílica é inicialmente lavada, classificada e separada gravimetricamente para remover impurezas e obter uma granulometria adequada.

A areia tratada é transportada para a tolva de alimentação, posteriormente passa por telas transportadoras e elevadores de alcatruzes, seguidamente num sem-fim de alimentação é misturada com aditivos químicos específicos (NaOH) ou (Ca(OH)<sub>2</sub>). Esta mistura influencia diretamente a qualidade da cristobalite produzida.

A Figura 2.1 apresenta um esquema geral de um forno de cristobalite. A mistura entra num secador de tambor rotativo através de um sem-fim, onde é pré-aquecida e completamente seca, preparando-a para a calcinação. O gás de escape do forno rotativo serve de gás de secagem da areia, que arrefece com a adição do ar envolvente. O gás de secagem flui pelo tambor do secador em contracorrente e arrefece posteriormente para aproximadamente 160 °C. No forno rotativo a areia é ainda aquecida até cerca de 1450 °C em contracorrente através de um queimador a gás natural. Após a saída do forno a cristobalite entra num leito fluidizado de arrefecimento a ar, onde é arrefecida até aproximadamente 850 °C enquanto o ar de combustão é pré-aquecido. Entrando num segundo arrefecedor, o chamado refrigerador de refluxo, a cristobalite é arrefecida até à temperatura final de aproximadamente 60 °C (dependendo da temperatura da água de arrefecimento), utilizando a água como meio de arrefecimento.

O calor residual do ar de arrefecimento utilizado no arrefecedor de leito fluidizado é recuperado com tecnologia de ponta e auxilia no aquecimento do processo do forno rotativo. Portanto, o forno rotativo requer menos energia externa para atingir a temperatura desejada para o processo de calcinação.

É de salientar que os gases de combustão do processo do forno rotativo também são utilizados para secar e aquecer a areia de sílica no secador de tambor. A energia térmica não utilizada torna-se, assim, utilizável, conservando recursos e aumentando a eficiência energética de toda a unidade produtiva (Grenzebach Group, 2025).



**Figura 2.1 - Esquema de produção da cristobalite** (Grenzebach Group, 2025).

A empresa SIFUCEL – Sílicas, S.A. com base no seu amplo conhecimento de mercado, identificou a oportunidade de produzir um novo produto inovador e de alto valor acrescentado. Produzir a partir de areia siliciosa especial de excelente qualidade, um produto de elevada qualidade. As suas principais características são a elevada percentagem de sílica, e não conter penalizantes como feldspatos, óxidos de ferro, outros minerais pesados e, ainda, grande homogeneidade de calibre. A cristobalite é muito valorizada para várias indústrias, devido às suas características de brancura e elevada resistência à abrasão.

Para a produção de cristobalite, a transposição da tecnologia de fornos rotativos exige cuidados com o perfil térmico, garantindo que a transformação de quartzo em cristobalite não se traduz em contaminações ou alterações cristalográficas indesejadas. No entanto, estudos demonstram que é possível adaptar esta tecnologia, assegurando temperaturas e tempos de residência adequados (Singh & Middendorf, 2007).

Existem diversas possibilidades de valorização energética, nomeadamente através da recuperação de gases quentes, mediante a integração de sistemas de cogeração que aproveitam fluxos térmicos residuais provenientes de outras unidades industriais, como centrais térmicas ou processos com geração significativa de calor. Outra possibilidade é a eletrificação com fontes renováveis, como por exemplo a substituição de combustíveis fósseis por eletricidade de origem renovável (solar, eólica e hídrica). A queima de biomassa ou Combustível Derivado de Resíduos (CDR), onde existe a substituição parcial de combustíveis convencionais, mantendo a eficiência térmica e a integridade do processo. Outra possibilidade é o aquecimento por indução ou micro-ondas, sendo estas tecnologias emergentes que reduzem perdas térmicas e permitem controlo preciso da temperatura (Chaouki et al., 2020).

O processo de fabrico apresenta semelhanças com o da produção do clínquer, no qual o material é introduzido no forno rotativo e se desloca ao longo do mesmo devido à sua rotação e ligeira inclinação. Durante este percurso ocorre o aquecimento progressivo e desenvolvem-se as reações físico-químicas características da formação do clínquer, atingindo temperaturas que podem alcançar cerca de 1450 °C, resultando no produto final - o clínquer. A partir dos 1450 °C inicia-se o arrefecimento do clínquer, ainda dentro do forno, sendo completado nos

arrefecedores de satélites, onde é introduzido ar em contracorrente com o clínquer, aproveitando-se este ar aquecido como ar de queima secundário. Desta forma, há uma recuperação parcial do conteúdo térmico do clínquer, por forma a reduzir o consumo de energia nos fornos. A reduzida emissão de partículas é assegurada através de sistemas de despoeiramento (filtros de mangas e electrofiltros) e a minimização das emissões de gases, através de sistemas de controlo automatizado da condução dos fornos (SECIL, 2025).

Em Portugal as empresas SECIL e CIMPOR têm apostado na modernização, fazendo alterações no processo produtivo, onde visa aproveitar o calor gerado no processo de produção de clínquer para produzir energia elétrica, reduzindo a dependência externa e as emissões associadas. Outra ação estratégica envolve a produção de argilas calcinadas na fábrica de Souselas, um material com menor pegada de carbono que pode substituir parcialmente o clínquer na produção de cimento da CIMPOR com uma operação mais limpa e eficiente. O setor cimenteiro, por natureza, torna a adaptação às novas exigências ambientais uma tarefa complexa, uma vez que este setor é um pouco resistente à mudança (Green Savers, 2024).

O processo de fabrico da argila calcinada (ou metacaulino) pode desempenhar um papel na fabricação de cimento substituindo parcialmente o clínquer e, assim, contribuir para a redução das emissões de CO<sub>2</sub>, uma vez que ao atingir menores temperaturas ao longo do seu processo produtivo, consumindo assim menos energia. Quando utilizada em combinação com outros materiais cimentícios suplementares, como cinzas volantes ou escórias, a argila calcinada pode ajudar a reduzir o teor geral de clínquer do cimento, mantendo ou melhorando as propriedades mecânicas e de durabilidade. A argila calcinada é fabricada onde os fornos aquecem materiais de argila natural a altas temperaturas (embora inferiores às do clínquer), tipicamente na faixa de 500-800 °C, para eliminar água e outros componentes voláteis. Para que a argila caulínica possa desenvolver a atividade pozolânica existe a necessidade que a mesma sofra um processo de calcinação e posteriormente a moagem, visando diminuição da sua granulometria. Quando o processo de moagem reduz o tamanho das partículas a valores inferiores a 5 µm, constata-se uma excelente atividade pozolânica, sendo denominado por alguns autores como metacaulino de alta reatividade. Esta capacidade pozolânica faz com que este material possa substituir parte do cimento no betão com o objetivo de aumentar a sua durabilidade e a sua resistência (Sérgio Lima Souza & Dal Molin, 2002).

Nas diversas indústrias podem ser utilizados diferentes tipos de combustíveis, de acordo com o combustível económico disponível na área local de cada unidade de produção, onde podem ser configurados uma variedade de queimadores de combustível para os vários tipos de indústrias. Como por exemplo (Bidragon Machinery Co., 2025):

- **Carvão:** económico e adequado para grandes secadores industriais;
- **Gás natural:** eficiente e limpo, com menos emissões;
- **Gases de petróleo liquefeito (GPL):** aquecimento rápido, adequado para áreas sem fornecimento de gás natural;

- **Diesel:** combustível de alto poder calorífico, indicado para locais com grandes consumos de energia e sem fornecimento de gás natural;
- **Combustível de biomassa:** madeira e cascas de arroz (cbladminit, 2025).

## 2.2. Avaliação do Ciclo de Vida

Após uma pesquisa aprofundada em bases de dados científicas e trabalhos académicos, não foram encontrados estudos específicos sobre ACV da cristobalite. Este facto pode ser atribuído à natureza específica deste material e à escassez de investigações focadas especialmente na avaliação do ciclo de vida do produto e poucas unidades de produção existentes no mundo.

No entanto, existem estudos relevantes sobre materiais e processos semelhantes que podem fornecer *insights* valiosos para este estudo. Um exemplo é o estudo de Souza (2012) com o objeto de análise da produção de areia extraída de leito fluvial numa pequena empresa de extração localizada na região de São José do Rio Preto, Brasil. O estudo de ACV seguiu as metodologias definidas pelas normas ISO 14040 e ISO 14044, com delimitação da sua estrutura no modelo *cradle-to-gate* e unidade funcional definida de 1 m<sup>3</sup> de areia extraída. Foram consideradas as etapas de extração, beneficiação, armazenagem e transporte, excluindo-se a fase de utilização e disposição final.

A recolha de dados primários *in loco* permitiu caracterizar o sistema produtivo, incluindo o consumo de energia (principalmente diesel), recursos hídricos, equipamentos e operações logísticas, complementado com dados secundários para o inventário de emissões e resíduos. As entradas do sistema compreenderam o uso de combustível fóssil, água e consumos operacionais, enquanto as saídas incluíram emissões atmosféricas (dióxido de carbono, óxidos de azoto e monóxido de carbono), efluentes líquidos, partículas suspensas e resíduos sólidos.

A avaliação de impacte ambiental foi realizada através do método EDIP (Environmental Development of Industrial Products), contendo cinco categorias de impacte: potencial de aquecimento global, formação de ozono troposférico, acidificação, toxicidade humana e ecotoxicidade. A análise evidenciou que as fases de extração e transporte da areia são as mais críticas do ponto de vista ambiental, em virtude do elevado consumo energético associado ao uso de dragas, bombas centrífugas e transporte rodoviário. O potencial de aquecimento global foi dominado pelas emissões de CO<sub>2</sub>, enquanto a formação de ozono troposférico, um dos impactes mais expressivos, apresentou valores significativos na fase de transporte (cerca de 16,3 kg C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> eq./m<sup>3</sup>). Foram ainda identificados efeitos relevantes associados à acidificação e toxicidade, decorrentes da combustão incompleta de diesel.

Foram propostas diversas medidas de mitigação, destacando-se a substituição de equipamentos obsoletos por alternativas mais eficientes do ponto de vista energético, o redimensionamento de bombas, a implementação de um programa de gestão da frota de veículos e dragas, e a instalação de sistemas de contenção de sedimentos para evitar perdas

durante o processo de carregamento. O estudo reforça a importância da aplicação da ACV como ferramenta de apoio à gestão ambiental e à escolha de decisões estratégicas nomeadamente nos equipamentos de pequena escala, promovendo melhorias no desempenho ambiental e contribuindo para a sustentabilidade da cadeia produtiva da areia.

Outro exemplo de um estudo de aplicação prática da metodologia de ACV do setor da construção elaborado por Bairras (2016) com foco na produção de betão com diferentes percentagens de agregados reciclados, em comparação com cimento convencional, tendo em conta a sua aplicação estrutural. O estudo seguiu os princípios e requisitos das normas ISO 14040 e 14044, e teve como objetivo principal quantificar e comparar os impactos ambientais associados às diversas formulações de betão, ao longo do seu ciclo de vida, com o apoio do software OpenLCA e da base de dados ELCD (European Life Cycle Database). A metodologia aplicada seguiu as quatro fases recomendadas pelas normas ISO: definição do objetivo e âmbito, inventário do ciclo de vida (ICV), avaliação de impacto do ciclo de vida (AICV) e interpretação.

A unidade funcional considerada foi 1 m<sup>3</sup> de betão produzido, e o sistema de estudo incluiu todas as etapas “do berço ao portão” (*cradle-to-gate*), nomeadamente extração e processamento de matérias-primas (cimento, agregados naturais e reciclados, adjuvantes e aditivos), transporte dos materiais e produção de betão. Foram comparados cinco tipos de betão auto-compactável: um de referência (sem agregados reciclados) e quatro com 10%, 20%, 30% e 40% de substituição de agregados naturais por agregados reciclados. A análise foi realizada com base na metodologia CML (desenvolvida pela Universidade de Leiden), e consideraram oito categorias de impacto: aquecimento global, acidificação, eutrofização, destruição da camada de ozono, ecotoxicidade, toxicidade humana, esgotamento de recursos abióticos e oxidação fotoquímica.

Os resultados demonstraram que o aumento da incorporação de agregados reciclados no betão origina um melhor desempenho ambiental global do produto, particularmente evidente na redução do potencial de aquecimento global (CO<sub>2</sub> eq.), na menor contribuição para a acidificação e no menor esgotamento de recursos abióticos. Observou-se, contudo, que o impacto da reciclagem depende significativamente da energia consumida no processamento dos resíduos de construção e demolição (RCD), bem como da eficiência dos sistemas de separação, trituração e triagem. A produção de agregados reciclados apresenta vantagens ambientais claras face à exploração de agregados naturais, contribuindo também para a mitigação da deposição de resíduos em aterros.

Na fase de interpretação, concluiu-se que, para aplicações estruturais, é tecnicamente viável incorporar até 40% de agregados reciclados sem comprometer o desempenho ambiental e mantendo-se dentro dos limites normativos. O estudo recomenda o alargamento da aplicação de agregados reciclados em betões estruturais, desde que garantidas as condições técnicas e ambientais de processamento e controlo de qualidade. A ACV revelou-se uma ferramenta essencial para apoiar decisões sustentáveis na engenharia civil, permitindo quantificar e comparar os impactos ambientais associados a diferentes soluções construtivas.

Em Portugal foi realizada uma dissertação de mestrado sobre o paradigma da avaliação ambiental quantitativa de sistemas de produto realizada por Pato (2015), com uma aplicação focada na indústria cimenteira. O objetivo primordial consistiu na inventariação e avaliação dos perfis de impacte ambiental associados à produção de cimento CEM II 32,5. Este tipo de cimento, caracterizado pela incorporação de aditivos (cinzas volantes e/ou escórias, como inferido das matérias-primas), representa uma formulação comum e de relevância ambiental dada a sua composição. Na análise efetuada à unidade fabril, utilizou-se a metodologia ACV, uma ferramenta standardizada e robusta para a avaliação de sistemas complexos.

A implementação da ACV seguiu as diretrizes das normas internacionais ISO 14040 e 14044. A definição do objetivo e âmbito do estudo estabeleceu um foco na fase "do berço ao portão" (*cradle-to-gate*), o que implica a inclusão de todas as operações desde a extração das matérias-primas - como calcário, argila, areia, e adição de cinzas volantes e escórias - o seu transporte até à fábrica, o processo de clínquerização (fundamental e energético), e a subsequente moagem do clínquer com a adição até à obtenção do produto final, o cimento ensacado ou a granel, pronto para expedição. A unidade funcional definida foi de 1 tonelada de cimento CEM II 32,5, permitindo a comparação dos fluxos e impactes em base equivalente.

Na fase de Inventário do Ciclo de Vida (ICV), procedeu-se à recolha exaustiva de dados de entrada e saída para todos os processos unitários compreendidos no sistema. Isso incluiu o consumo de energia (elétrica, fuelóleo, gás natural, etc.), consumo de água, emissões atmosféricas (CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub>, poeiras, etc.), e a produção de resíduos. Estes dados foram posteriormente processados e atribuídos à unidade funcional.

A avaliação de impacte ambiental foi conduzida utilizando metodologias de referência, como o CML 2001 (*baseline*), permitindo a categorização e caracterização dos potenciais impactes. Os resultados, sintetizados da contribuição da energia primária consumida por tipo (gasóleo, fuelóleo, energia elétrica) –, revelaram que o Potencial de Aquecimento Global (PAG) e o Potencial de Depleção de Recursos Abióticos (PDRA-E, para energia) representam as categorias de impacte ambiental de maior expressão. Especificamente, a análise dos fluxos de energia demonstrou que o consumo de energia elétrica, frequentemente proveniente de uma matriz energética com uma componente significativa de combustíveis fósseis, e o consumo direto de fuelóleo nos fornos de clínquer, são os maiores contribuintes para o PAG. As emissões de CO<sub>2</sub> de processo, resultantes da descarbonatação do carbonato de cálcio durante a clínquerização, foram igualmente identificadas como um fator determinante para o PAG. Indicadores como o Potencial de Acidificação (PA), Potencial de Eutrofização (PE), Potencial de Depleção da Camada de Ozono (PDCO), Potencial de Formação de Ozono Fotoquímico (POF), e Potencial de Toxicidade Humana (PTH), foram igualmente quantificados, providenciando uma visão multifacetada dos constrangimentos ambientais.

Segundo Tribout et al. (2024) foi proposta uma abordagem metodológica inovadora baseada na ACV para valorizar resíduos de betão pronto não utilizado, convertendo-os em argamassas secas industriais. Ao contrário da prática comum, em que a ACV é aplicada após

os estudos técnicos, esta investigação coloca a ACV como ferramenta de decisão no início do processo, assegurando que os critérios ambientais orientam o desenvolvimento do produto.

A investigação centra-se na substituição de areia natural por areia reciclada proveniente da trituração de excedentes de betão. A análise ambiental preliminar demonstra benefícios claros das categorias como o uso de recursos minerais e metais, com uma taxa de substituição de 55% sendo suficiente para anular o impacto sobre os recursos naturais. A distância máxima de transporte para manter a rentabilidade ecológica foi identificada em cerca de 200 km.

Do ponto de vista técnico, foram desenvolvidas formulações com diferentes taxas de substituição (33%, 66% e 100%), garantindo-se que as argamassas produzidas cumprissem os requisitos da classe M10 ( $\geq 10$  MPa de resistência à compressão). O uso de cimento com menor teor de clínquer (CEM III/A) contribuiu para melhorar o desempenho ambiental sem comprometer a resistência mecânica.

A análise económica, baseada na metodologia de Custos do Ciclo de Vida (CCV), demonstrou que a utilização de areia reciclada pode ser economicamente vantajosa mesmo quando o seu custo é superior ao da areia natural. Esta viabilidade económica deve-se a fatores como menor densidade, menor distância de transporte e ausência de secagem.

Dahanni et al. (2024) apresenta uma revisão crítica da literatura recente sobre a ACV da produção de cimento, com o objetivo de aferir a relevância dos dados e modelos atuais para avaliar estratégias de mitigação das alterações climáticas adotadas pela indústria produtora de cimento.

Foram analisadas três estratégias principais:

- **Eficiência material**, que visa reduzir a quantidade de cimento necessária através da melhoria da sua qualidade;
- **Melhoria tecnológica nas fábricas**, incluindo a eficiência térmica dos fornos e o uso de combustíveis alternativos de baixo carbono;
- **Redução da proporção de clínquer no cimento**, através da substituição por materiais cimentícios suplementares (SCMs), como a escória.

A ACV revela-se adequada para avaliar o impacto ambiental destas estratégias, desde que os modelos de inventário utilizados sejam suficientemente robustos e representativos. A produção de clínquer, devido à calcinação de calcário e ao consumo de energia térmica, continua a ser o principal contribuinte para as emissões de GEE. A substituição do clínquer por escórias evidencia uma redução significativa das emissões de CO<sub>2</sub>, cuja magnitude varia em função do método de alocação adotado - seja o cut-off, em que a escória é considerada um resíduo sem carga ambiental prévia; a alocação em massa ou por valor económico, que distribuem os impactos da produção siderúrgica entre o aço e a escória conforme a sua proporção física ou valor de mercado; ou ainda a expansão do sistema com substituição, que

atribui um crédito ambiental pela substituição do clínquer, refletindo assim diferentes abordagens na atribuição dos impactos ambientais.

A análise identifica falta de informação, tais como: falta de dados sobre consumos energéticos específicos (especialmente na moagem), ausência de consideração da disponibilidade real de resíduos utilizados como SCM ou combustíveis alternativos, e inconsistências na definição da unidade funcional e do fluxo de referência nos estudos comparativos. Observou-se ainda que muitos estudos não contabilizam corretamente o impacto dos combustíveis secundários ou os benefícios da recuperação de resíduos, o que compromete a comparabilidade dos resultados.

O estudo propõe a necessidade de metodologias mais transparentes, a inclusão de dados reais de emissões medidos em fábrica, e a definição clara da funcionalidade do cimento (por exemplo, resistência à compressão a 28 dias do betão) como base para a normalização dos fluxos de referência. Além disso, destaca-se a importância da modelação detalhada da energia de moagem e da avaliação cuidadosa dos métodos de alocação, dada a sua influência crítica nos resultados da ACV.

Tasiopoulou et al. (2023) exhibe uma abordagem integrada de simulação de processo e ACV para a produção de metacaulino (MK), um SCM com potencial para reduzir significativamente o impacto ambiental da produção de cimento. A produção de MK resulta da calcinação do caulino ( $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ ) a temperaturas entre 650 e 850 °C, conduzindo à formação de uma fase amorfa altamente pozolânica.

Foram desenvolvidos modelos de simulação em Aspen Plus® que permitiram avaliar o impacto de diversos parâmetros operacionais, nomeadamente a temperatura de calcinação, o teor de humidade da matéria-prima, a recirculação dos gases de escape (EGR) e o tipo de combustível utilizado (gás natural, carvão, coque de petróleo e combustíveis alternativos como resíduos de plásticos, pneus e resíduos sólidos urbanos). A análise teve como foco principal o consumo energético e as emissões de  $\text{CO}_2$  associadas à produção de 1 kg de MK.

A ACV foi conduzida numa abordagem de *cradle-to-gate*, com recurso ao software SimaPro e à base de dados Ecoinvent v3.8, considerando o potencial de aquecimento global (GWP 100) como categoria de impacto. Os resultados indicam que o aumento da temperatura de calcinação e da humidade do caulino implicam maiores exigências térmicas e emissões associadas, enquanto a aplicação da recirculação de gases permite uma redução de até 38,5% nas emissões de  $\text{CO}_2$ . A substituição parcial de combustíveis fósseis por combustíveis alternativos reduziu as emissões até 8%, sendo os resíduos plásticos os mais eficazes.

A produção de MK apresentou consistentemente um menor potencial de aquecimento global (463–695 kg  $\text{CO}_2$ -eq/tonelada de MK) em comparação com o clínquer convencional (923 kg  $\text{CO}_2$ -eq/tonelada), representando uma redução entre 25% e 50%, principalmente pela ausência de emissões provenientes da calcinação do calcário.

Este trabalho destaca a importância de considerar parâmetros operacionais realistas e cenários energéticos adaptados à realidade industrial, promovendo a produção de ligantes

mais sustentáveis e compatíveis com as metas de neutralidade carbônica definidas pelo Pacto Ecológico Europeu.

Grbeš (2016) concretiza uma ACV do processo de beneficiamento de areia siliciosa (areia de quartzo) destinada à indústria de vidro, com foco na quantificação dos impactos ambientais associados às diferentes técnicas de processamento aplicadas na Croácia. A investigação, conduzida entre 2009 e 2012, analisa oito alternativas de processamento, das quais se destacam os métodos de separação eletrostática, flotação e concentração gravítica.

A ACV foi realizada com base numa unidade funcional de 1 tonelada de areia siliciosa de qualidade vidreira, utilizando o software SimaPro e o método de avaliação de impacto ReCiPe (*Midpoint* e *Endpoint*). As alternativas incluem variantes húmidas e secas dos métodos mencionados, bem como um cenário simulado de importação a partir da Suíça (baseado em dados Ecoinvent).

Os resultados indicam que os processos com menor impacto ambiental são os que empregam técnicas básicas de lavagem e classificação por tamanho ou densidade, desde que a matéria-prima seja de alta pureza. Por outro lado, alternativas que envolvem secagem intensiva e utilização de reagentes químicos (como na flotação e separação eletrostática) apresentam maiores impactos, sobretudo devido ao elevado consumo de combustíveis fósseis, eletricidade e substâncias tóxicas. A separação gravítica, embora dependente da qualidade dos minerais e de parâmetros operacionais complexos, mostrou-se promissora do ponto de vista ambiental.

As categorias de dano ambiental (*Endpoint*) consideradas por (Grbeš, 2016) com maiores impactos foram: saúde humana (medida em DALY – ano de vida ajustado por incapacidade), ecossistemas (espécies.ano) e recursos (€). O contributo dos processos baseados em combustíveis fósseis revelou-se dominante em todas as categorias de impacto, sugerindo que melhorias na eficiência energética e a substituição de fontes energéticas fósseis por alternativas mais sustentáveis devem ser priorizadas no redesenho de processos.

A análise de contributo revelou que a extração e transporte da areia bruta representam uma fração significativa do impacto total, e que a otimização da logística e da gestão de operações (por exemplo, escavação contínua) poderá trazer benefícios ambientais adicionais (Grbeš, 2016).

Brasil (2018) incide sobre a caracterização de areias siliciosas localizadas numa área licenciada para prospeção e pesquisa, na região de Alpedriz, concelho de Alcobaça, com o intuito de avaliar o seu potencial para aplicação na indústria vidreira. As areias siliciosas, constituídas maioritariamente por quartzo ( $\text{SiO}_2$ ), são uma matéria-prima estratégica para diversas indústrias, exigindo elevada pureza e granulometria controlada.

A metodologia adotada envolveu a realização de prospeção sísmica de refração, modelação geológica 3D e colheita de amostras a três profundidades, que foram posteriormente analisadas por fluorescência de raios-X (XRF) para determinação da composição química e por QEMSCAN para avaliação mineralógica e morfométrica. Os resultados revelaram teores

de sílica superiores a 95% em peso (na forma de óxido), destacando-se a presença residual de feldspatos, plagioclases e turmalina (0,2%), o que sugere um elevado grau de pureza. O ferro, um contaminante relevante para a indústria vidreira, encontra-se abaixo de 0,25%.

A análise morfométrica dos grãos indica uma predominância da classe sub-angular, com implicações relevantes na qualidade do vidro fundido. A interpretação dos dados sísmicos permitiu a identificação das interfaces superiores e inferiores da formação arenosa, possibilitando a estimativa de um volume explorável de cerca de 2 milhões de m<sup>3</sup>.

Face aos critérios exigidos pela indústria vidreira e outras aplicações industriais (fundição, fraturação hidráulica), os depósitos estudados apresentaram qualidade e volume compatíveis com a exploração económica, mediante processos de beneficiação como lavagem, classificação e eventual separação magnética. O estudo contribuiu, assim, para o inventário nacional de recursos minerais e para a integração da ACV na gestão sustentável de matérias-primas minerais.

Mlinde (2024) apresenta uma comparação do seu desempenho ambiental da produção de diferentes materiais geopoliméricos (GPM) face aos materiais de cimento Portland convencional (OPCM). A metodologia adotada segue as diretrizes da norma ISO 14040, utilizando a ferramenta LCA for Experts e a base de dados Ecoinvent, reconhecidas internacionalmente na análise ambiental de produtos. A unidade funcional é declarada como 1 m<sup>3</sup> argamassa GPM com propriedades mecânicas semelhantes às do OPCM.

A avaliação abrange cinco formulações distintas, das quais três correspondem a GPM e duas a OPCM. As análises incluíram todos os processos relevantes do ciclo de vida, desde a extração e produção das matérias-primas (incluindo metacaulino, cinzas volantes, areia siliciosa, água e ativadores alcalinos), passando pela fase de produção do betão/argamassa, até à fase de transporte. Para cada composição, foram considerados indicadores ambientais fundamentais: potencial de aquecimento global, consumo de água, uso de energia primária renovável, toxicidade humana (com especial atenção na cancerígena), e uso de recursos minerais e metálicos.

Os resultados evidenciam que os GPM, em determinadas formulações, demonstram um menor impacto ambiental global quando comparados aos OPCM, nomeadamente na categoria de alterações climáticas e toxicidade humana. Contudo, os impactos associados à produção de ativadores alcalinos, em especial o silicato de sódio, representam uma contribuição ambiental significativa, o que pode comprometer parte dos benefícios ambientais dos GPM. Verificou-se ainda que a proporção e o tipo de precursores (metacaulino vs. cinzas volantes), bem como a relação entre os ativadores, influenciam fortemente tanto o desempenho ambiental como a resistência mecânica dos materiais.

Neste contexto, conclui-se que, embora os materiais geopoliméricos apresentem um elevado potencial como alternativa sustentável ao cimento Portland, a sua eficácia ambiental está condicionada a uma otimização criteriosa da composição das misturas. A substituição parcial ou total dos componentes de elevado impacto, como o silicato de sódio, por alternativas de

menor pegada ecológica, poderá potencializar significativamente os benefícios da utilização de GPM em aplicações na construção civil.

### 3. Produção de cristobalite

#### 3.1. Caracterização geográfica e geológica

A unidade de produção localiza-se no concelho de Rio Maior e abrange uma área de 277,4 km<sup>2</sup>. As várias linhas de água que percorrem o seu território constituem uma densa rede hidrográfica da qual se destaca o rio Maior que deu nome à localidade e concelho.

No concelho de Rio Maior existe um importante núcleo de exploração de areias caulínicas de elevado valor económico que advém, por um lado, da elevada pureza das areias que as torna aptas para a indústria vidreira e, por outro, do aproveitamento secundário do caulino para diversas indústrias, em particular a da cerâmica branca.

O depósito mineral Areias de Rio Maior localiza-se na freguesia e concelho de Rio Maior e distrito de Santarém, no centro de Portugal. Encontra-se nas imediações das povoações de Rio Maior, Azinheira, Quintas e do Parque Industrial de Rio Maior, onde se localiza a sede da SIFUCEL – Sílicas, S.A. e a zona de beneficiação das areias. Na figura 3.1 a delimitação do concelho de Rio Maior em azul, e em verde a delimitação da freguesia de Rio Maior. O quadrado laranja representa a localização da mina Via-Vai da SIFUCEL (Centro de Informação Geoespacial do Exército, 2008).

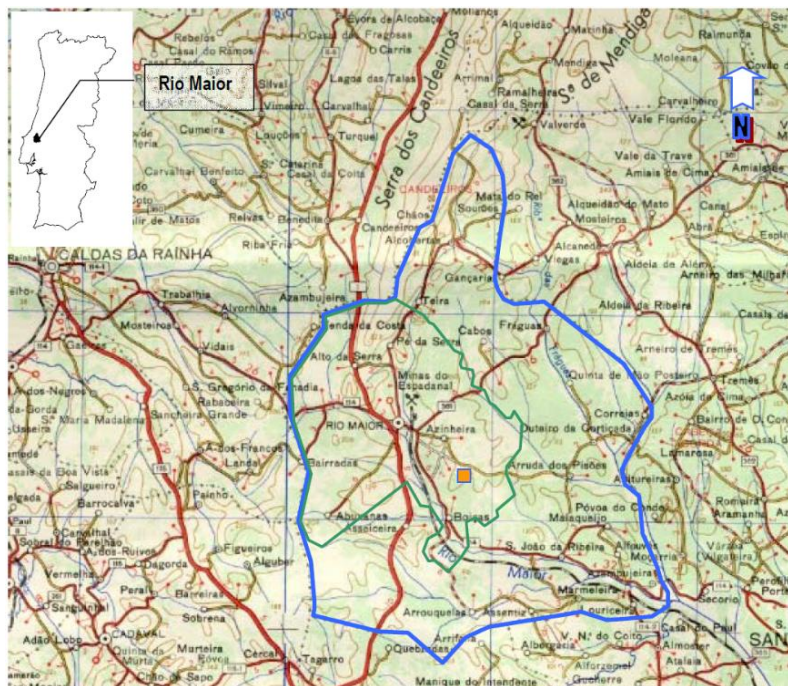
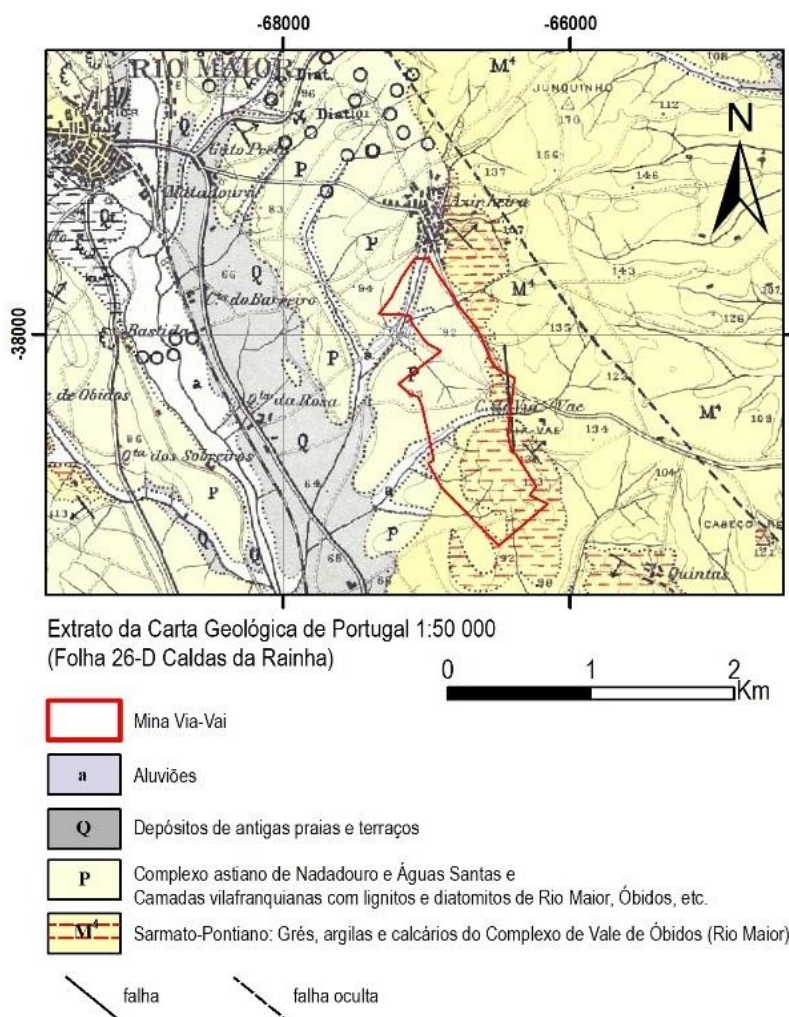


Figura 3.1 - Extrato da Carta Militar de Portugal à escala 1:250 000, folha n.º 5, do IGE.

### 3.1.1. Descrição Geológica Regional

A área da mina Via-Vai enquadra-se no flanco oeste da Bacia Terciária do Tejo, mais precisamente, numa pequena bacia denominada de bacia tectónica de Rio Maior. A área considerada está representada no extremo SE da folha 26-D (Caldas da Rainha) da Carta Geológica de Portugal, à escala 1:50 000, publicada pelos Serviços Geológicos de Portugal (Figura 3.2) (Zbyszewski & Moitinho de Almeida, 1960).



**Figura 3.2 – Adaptado de Zbyszewski & Moitinho de Almeida (1960) Enquadramento geológico da "Bacia de Rio Maior", baseado na Carta Geológica de Portugal, escala 1/50 000, Folhas 26D.**

A bacia tectónica de Rio Maior, corresponde a uma depressão alongada na direção NNW-SSE, estendendo-se ao longo de 7,5 km e com largura máxima de 4 km. O substrato é formado pelas formações do Miocénico, como é visível o contato nos bordos norte, oeste e sul. O bordo oriental é limitado pela falha do Cidral (Figura 3.2).

A génese e a deformação da bacia tectónica de Rio Maior estão relacionadas com a tectónica diapírica responsável pela formação dos vales tifónicos das Caldas da Rainha e da Fonte da Bica (NNW de Rio Maior). O movimento tectónico das camadas salinas desencadeou a

depressão da área de Rio Maior, o que permitiu a formação da bacia. A sedimentação concomitante à tectónica resultou num sinclinal com um flanco ocidental que possui inclinações nunca superiores a 15°, com vergência para NE, e um flanco oriental, com inclinações maiores junto à falha do Cidral.

O enchimento sedimentar desta bacia compreende, da base para o topo, uma espessa camada de areias finas caulíníferas, diatomitos e lignitos em camadas mais ou menos alternadas e, por último uma cobertura greso-argilosa.

### 3.1.2. Descrição do depósito mineral

A área da mina Via-Vai aflora no setor central da Bacia de Rio Maior (Figura 3.2). Enquadra-se totalmente nas formações sedimentares pliocénicas da Bacia de Rio Maior (P). Por isso, as formações geológicas mineralizadas que afloram na área são as do “Complexo astiano de Nadadouro e Águas Santas e camadas vilafranquianas com lignitos e diatomitos de Rio Maior, Óbidos, etc” (Figura 3.2). Devido à proximidade, a SE, com uma mancha cartografada de rochas do Mioceno, também se pode considerar a possibilidade da sua ocorrência na área (Figura 3.2).

É na formação geológica pliocénica (P) que está a fonte da matéria-prima a explorar, as espessas camadas de areias finas caulíníferas (Zbyszewski & Moitinho de Almeida, 1960).

A unidade litoestratigráfica das areias caulíníferas é constituída por areias finas bem calibradas de cor branca, rosada ou avermelhada, com intercalações de argilas amareladas ou acinzentadas e raros níveis conglomeráticos. A extensão desta unidade é variável, podendo variar entre os 40 m e os 120 m de espessura. A fração arenosa é constituída essencialmente por quartzo, ocorrendo como minerais acessórios, a turmalina, a andaluzite, a silimanite, a distena, o zircão e o rutilo. As frações silto-argilosas revelam a caulinite como mineral dominante. As areias descritas são designadas de areias especiais, devido ao seu elevado grau de pureza ( $\text{SiO}_2 > 98\%$ ) e distribuição granulométrica, destinando-se às indústrias do vidro, cerâmica, tintas, alimentar e fundição.

## 3.2. Caso de Estudo

O caso de estudo baseia-se num produto “cristobalite” da empresa portuguesa SIFUCEL – Sílicas, S.A., fundada em 1965 e integrada no Grupo Parapedra desde 1995. É uma empresa portuguesa especializada na extração e transformação de areias siliciosas especiais e caulino. Com sede em Rio Maior, a empresa possui várias unidades de produção em Portugal, incluindo Rio Maior, Alcácer do Sal e Mosteiros (Alcanede).

Os detalhes do processo produtivos não são apresentados pormenorizadamente devido a questões de confidencialidade, salientando ainda que todas as informações foram recolhidas no local, e aplicadas ao processo de produção de cristobalite.

A unidade de Rio Maior destaca-se pela produção de areias siliciosas de elevada pureza, extraídas da mina "VIA-VAI", localizada na proximidade. A extração é realizada através de

um sistema de dragagem por pipeline como pode ser observado na figura 3.3, permitindo uma operação eficiente e ambientalmente responsável. Após a extração, as areias especiais são submetidas a uma série de etapas de beneficiamento, que incluem lavagem, classificação granulométrica e secagem. Esta unidade possui uma elevada capacidade de produção, sendo predominantemente orientada para o mercado internacional. Os produtos fabricados em Rio Maior incluem sílicas de alta qualidade, como cristobalite e sílica para diversas indústrias, como vidro, cerâmica, fundição, tintas, cosmética, engenharia de superfícies e construção civil (Grupo Parapedra, 2025).



**Figura 3.3 - Lagoa da mina Via-Vai - SIFUCEL.**

A cristobalite produzida no forno em Rio Maior (Figura 3.4) distingue-se no mercado internacional pela sua brancura excepcional, elevada dureza e resistência à abrasão, características particularmente valorizadas nos diversos setores.



**Figura 3.4 - Forno de Cristobalite da SIFUCEL em Rio Maior.**

Com uma forte orientação para a exportação, a unidade de Rio Maior tem consolidado a sua posição como fornecedora de cristobalite de elevado desempenho técnico, sobretudo para mercados exigentes da Europa Central, América do Norte e Ásia (Grupo Parapedra, 2025).

Do ponto de vista ambiental, a SIFUCEL tem vindo a implementar uma série de medidas de modernização e eficiência ecológica. Entre as mais relevantes, destacam-se:

- Melhoria dos sistemas de tratamento de águas residuais, assegurando a redução da carga poluente e a reutilização da água nos processos produtivos;
- Instalação de painéis solares fotovoltaicos, visando a produção descentralizada de energia renovável e a redução da pegada carbónica associada ao consumo elétrico da unidade;
- Investimentos em automação e monitorização de processos, que permitem uma gestão mais eficiente dos recursos e a minimização de perdas energéticas.

Estas ações integram uma estratégia empresarial alinhada com os princípios da sustentabilidade e da economia circular, tornando a SIFUCEL num exemplo relevante de transição para práticas industriais mais sustentáveis no setor extrativo e transformador.

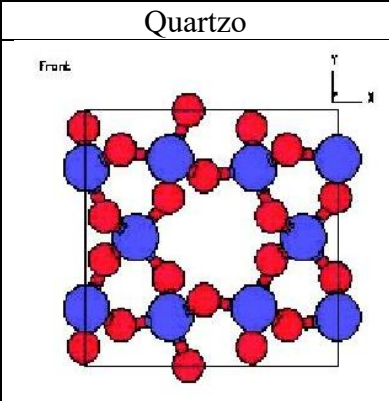
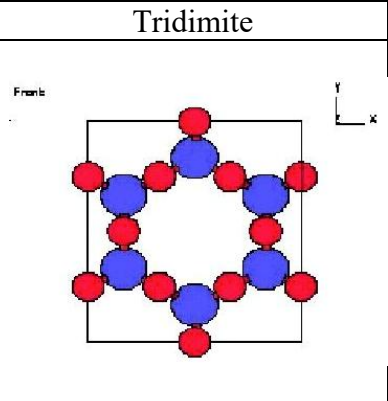
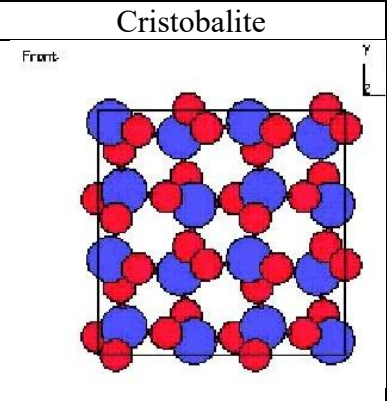
### 3.3. Cristobalite vs areia siliciosa

A cristobalite e a areia siliciosa especial de sílica apresentam diferenças significativas no que respeita à sua origem, composição, características físico-químicas e aplicações industriais, sendo ambas matérias-primas relevantes em setores como o da cerâmica, do vidro e de materiais compósitos, mas com finalidades e comportamentos distintos.

A cristobalite é um produto de origem industrial, obtido através do processo de transformação de areia siliciosa especial. Trata-se de um material com elevada pureza e apresenta uma composição com teores de dióxido de silício ( $\text{SiO}_2$ ) superiores a 99%, com baixos níveis de impurezas como óxidos de ferro ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), alumínio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) e metais pesados, cuja composição química e granulometria são cuidadosamente controladas durante o seu fabrico. Esta característica confere-lhe propriedades técnicas adequadas a aplicações específicas, nomeadamente em formulações cerâmicas de alto desempenho, revestimentos refratários e produtos onde se requer um comportamento térmico ou ótico particular. Por ser um material transformado, a cristobalite apresenta também uma elevada homogeneidade e estabilidade química, o que a torna particularmente adequada a processos industriais que exigem consistência e precisão nos parâmetros físico-químicos das matérias-primas (Grupo Parapedra, 2025).

A cristobalite, é uma forma cristalina de dióxido de silício ( $\text{SiO}_2$ ) que sofre a sua transformação desde o formato de quartzo, tridimite até à cristobalite, como pode ser observado na tabela 3.1. A sua produção, contudo, envolve transformações térmicas significativas, com consumo energético relevante, o que justifica o seu enquadramento num estudo de ACV.

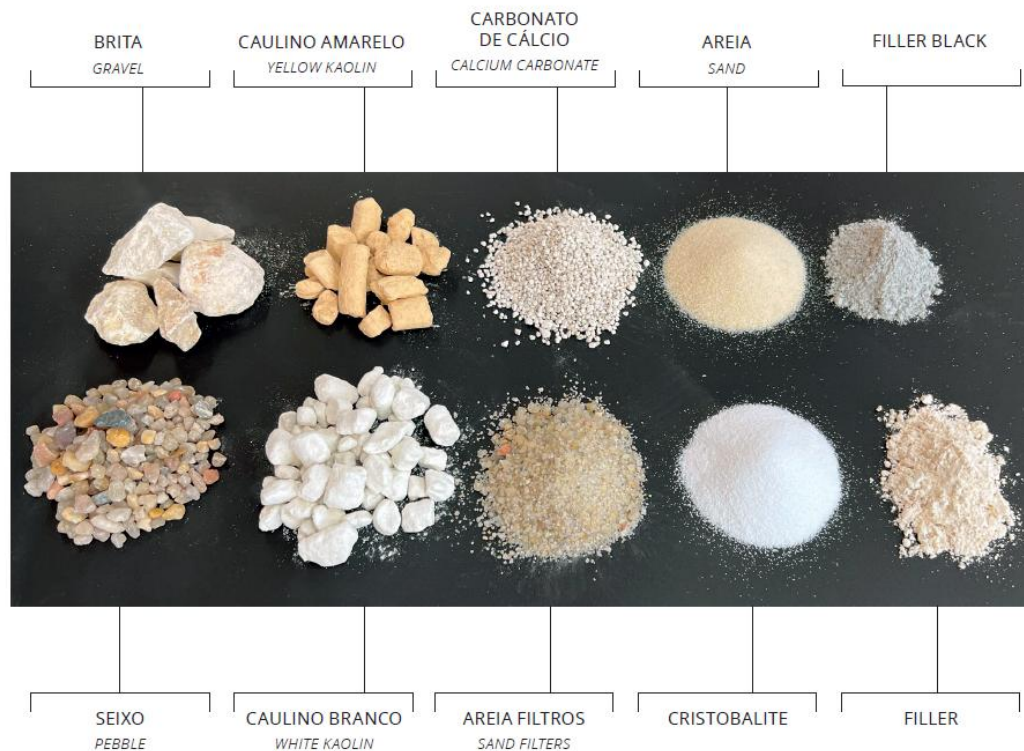
Tabela 3.1 - Polimorfos da sílica cristalina (Key-Schwartz et al., 2003).

Quartzo	Tridimite	Cristobalite
		
<p><b>Estrutura Cristalina:</b> Hexagonal</p>	<p><b>Estrutura Cristalina:</b> Hexagonal ou ortorrômbica</p>	<p><b>Estrutura Cristalina:</b> Cúbica a altas temperaturas (beta) e tetragonal a baixas (alfa)</p>

Propriedades particulares da cristobalite (Grupo Parapedra, 2025):

- Elevado grau de brancura ( $Y > 97$ );
- Baixa densidade ( $2,35 \text{ g/cm}^3$ );
- Estabilidade química elevada;
- Estabilidade sob elevadas temperaturas;
- Baixa expansão térmica.

A areia siliciosa é um recurso natural, extraído a partir de depósitos e submetido a processos físicos de lavagem, separação granulométrica e secagem, como pode ser observado na figura 3.5 os diferentes tipos de areias e outros agregados. A areia siliciosa especial de Rio Maior apresenta uma elevada percentagem de dióxido de silício ( $\text{SiO}_2$ ) superiores a 99%, com baixos níveis de impurezas como óxidos de ferro ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), alumínio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) e metais pesados. A areia siliciosa especial é amplamente utilizada em diversas indústrias, como a produção de vidro especial, a construção civil, a fundição e o fabrico de filtros, sendo valorizada sobretudo pela sua abundância, baixo custo e versatilidade.



**Figura 3.5 - Diferentes produtos do Grupo Parapedra** (Grupo Parapedra, 2025).

A principal diferença reside no facto da cristobalite ser um material industrial com especificações técnicas muito precisas e de origem controlada, onde a estrutura mineralógica é controlada através do equipamento de difração de raios X, a cor é verificada através de um colorímetro ou espectrofotómetro, os pontos negros através da análise visual ou de equipamentos óticos específicos como pode ser observado na figura 3.6, enquanto a areia

siliciosa especial é um material natural, com características de brancura inferior à cristobalite, com mais variáveis e aplicações mais generalistas.



**Figura 3.6 - OCS Powder Tester (PT2C)** (OCS Optical Control Systems GmbH, 2025).

## 4. Avaliação do ciclo de vida da cristobalite

O presente trabalho baseou-se na aplicação da metodologia de ACV, conforme descrita pelas normas internacionais ISO 14040 e ISO 14044, que estabelecem os princípios, a estrutura, os requisitos e as diretrizes necessárias para a execução de estudos de ACV, assegurando a fiabilidade, transparência e comparabilidade dos resultados.

Neste capítulo apresentam-se os principais resultados obtidos ao longo da ACV aplicada à produção de cristobalite, com vista à identificação e quantificação dos impactos ambientais associados. A análise incide sobre as várias fases do ciclo de vida, desde a extração de matérias-primas até à saída do produto da fábrica, do berço ao portão (*cradle-to-gate*), com base nos dados recolhidos e processados.

Os resultados são organizados por categorias de impacto ambiental relevantes, permitindo uma comparação direta entre as tecnologias ou rotas de produção estudadas. A discussão crítica foca-se nos contributos específicos de cada processo unitário, no consumo de energia e matérias-primas, nas emissões atmosféricas e nos fluxos residuais, destacando os principais pontos críticos em termos de sustentabilidade ambiental.

São ainda discutidos os resultados obtidos, com especial enfoque nos contributos diferenciados das fases do ciclo de vida e das opções tecnológicas consideradas, num alinhamento com os objetivos definidos para o presente estudo.

### 4.1. Objetivos e Âmbito

A presente ACV tem como principal objetivo quantificar e analisar os potenciais impactos ambientais associados à produção industrial de cristobalite, com especial enfoque nas etapas que ocorrem desde a extração da matéria-prima até à saída do portão da unidade fabril, numa abordagem *cradle-to-gate*. Através da aplicação desta metodologia de avaliação de impacto, onde foi utilizado o Environmental Footprint, pretende-se identificar os processos com maior contribuição ambiental, apoiar a decisão para estratégias de mitigação e promover a sustentabilidade na cadeia de valor do produto.

O estudo visa, especificamente:

- Avaliar os potenciais impactos ambientais de referência da produção de cristobalite num contexto industrial nacional;
- Identificar os fluxos e subprocessos críticos ao longo do ciclo de vida, tais como o consumo energético na classificação da areia e no forno rotativo;
- Fornecer uma base comparativa para futuras melhorias tecnológicas ou substituição de fontes energia com mais emissões;
- Contribuir com dados quantitativos para o desenvolvimento de estratégias de economia circular e neutralidade carbónica para o setor dos materiais cerâmicos e minerais.

A unidade funcional considerada foi a produção de 1 kg de cristobalite, seca e pronta para expedição, conforme as especificações técnicas de brancura  $Y > 97$ , granulometria 0,1 mm-0,5 mm e o menor número de pontos negros do produto final. Esta unidade funcional permite normalizar todos os fluxos e resultados do impacto e representa a escala industrial típica do processo analisado.

As fronteiras do sistema abrangem todas as etapas relevantes do ciclo de vida até à saída do produto final da fábrica, nomeadamente:

- Extração e transporte da areia siliciosa (matéria-prima principal), proveniente da unidade de Rio Maior;
- Processamento e classificação da areia;
- Processos térmicos de calcinação para transformação da areia siliciosa especial em cristobalite;
- Consumos de energia térmica e elétrica;
- Emissões diretas (por exemplo, CO<sub>2</sub> da combustão);
- Embalamento do produto final e preparação para expedição.

Foram excluídas do sistema as fases de transporte até ao cliente, utilização e fim de vida da cristobalite, por se tratar de um estudo *cradle-to-gate* e por não existirem informações específicas sobre o destino ou aplicação final do produto, que podem variar substancialmente conforme o setor (marmocompactos, cerâmica, vidros especiais, abrasivos, tintas, plásticos, etc.).

Algumas suposições foram adotadas para garantir a viabilidade da modelação, nomeadamente:

- Considerou-se os dados médios anuais para o consumo de materiais (2022-2024);
- Utilizou-se os dados secundários provenientes da base de dados Ecoinvent 3.11, sempre que dados primários não estavam disponíveis;
- Assumiu-se que todos os processos ocorrem em condições operacionais típicas e estáveis.
- Utilizou-se a regra *cut-off* para excluir fluxos intermediários e processos inferiores a 1% (em massa ou pela sua relevância ambiental), verificando que no acumulado não ultrapassem 5%, por se considerar que não terão uma relevância significativa nos resultados.
- Os resíduos e materiais recicláveis foram considerados numa abordagem de alocação *cut-off* pela classificação, onde foi considerado o tratamento de resíduos não recicláveis. No caso dos materiais recicláveis, o respetivo tratamento foi considerado apenas quando o processo de produção não contempla a incorporação de material reciclado, de

forma a assegurar uma contabilização rigorosa das etapas de tratamento e a prevenir a duplicação de cargas ambientais no inventário do ciclo de vida.

A limitação principal do estudo prende-se com a incerteza associada a algumas emissões e consumos energéticos indiretos, sobretudo na fase de extração e calcinação. No entanto, estas limitações foram tratadas com medidas de triangulação de dados e verificação cruzada sempre que possível.

## 4.2. Inventário do Ciclo de Vida da Cristobalite

O Inventário do Ciclo de Vida (ICV) constitui uma das etapas fundamentais da Avaliação do Ciclo de Vida, permitindo a quantificação sistemática dos fluxos de entrada (inputs) e saída (outputs), nomeadamente os consumos de matérias-primas, energia, água, bem como as emissões e resíduos produzidos durante o processo de produção da cristobalite. Esta etapa foi essencial para fornecer os dados base que suportam a avaliação dos impactos ambientais.

A recolha de dados foi realizada através de duas abordagens complementares:

- **Fontes primárias:** dados operacionais fornecidos pela unidade industrial, incluindo consumos médios de gás natural, eletricidade, areia siliciosa e aditivos, bem como dados sobre os fluxos de resíduos.

- **Fontes secundárias:** foram utilizadas bases de dados reconhecidas internacionalmente, nomeadamente Ecoinvent 3.11, para processos auxiliares como transporte de materiais, produção de combustível, produção de energia elétrica, produção de calor e emissões difusas não monitorizadas diretamente.

Na produção de cristobalite, a areia é extraída por uma draga elétrica e transportada até à unidade de lavagem por meio de bombas elétricas. A energia necessária para estas operações é fornecida parcialmente por uma instalação de painéis fotovoltaicos para autoconsumo, cobrindo uma fração de 5,3% da energia total consumida na unidade. A restante eletricidade é proveniente da rede pública de média tensão até ao final de 2024 e atualmente de alta tensão com a instalação de uma subestação na unidade de produção em Rio Maior.

Após a extração, a areia siliciosa húmida é sujeita a uma etapa de lavagem e classificação granulométrica, com o objetivo de remover impurezas e adequar o material às especificações técnicas exigidas para os diversos mercados e para o processo térmico subsequente. Esta etapa ocorre em instalações industriais dedicadas, que incluem bombagem, lavagem, classificação e hidro-cicloneamento, montados num pavilhão metálico equipado com estruturas de aço e revestimentos de borracha em algumas zonas críticas para reduzir o desgaste e ruído da instalação. A água utilizada neste processo é recirculada, com o apoio de sistemas internos de tratamento e clarificação, minimizando o consumo hídrico global.

Concluída a etapa de lavagem e classificação, a areia classificada segue a conversão térmica de cristobalite. Esta transformação ocorre num forno rotativo industrial sendo os motores alimentados com energia elétrica, especialmente concebida para a obtenção de cristobalite a

partir de areia siliciosa especial, a temperaturas elevadas, geralmente superiores a 1.450 °C. O forno é alimentado por gás natural. Durante esta etapa, a sílica sofre uma reorganização estrutural, transformando-se na fase cristalina de cristobalite.

O funcionamento contínuo do forno, associado à elevada temperatura de operação, exige um rigoroso controlo dos parâmetros de processo, realizado através de sistemas automatizados e sensores térmicos. O controlo da atmosfera do forno e a gestão térmica são essenciais para garantir a qualidade do produto final, nomeadamente em termos de brancura, homogeneidade da estrutura cristalina.

A modelação do sistema foi realizada utilizando um software especializado de ACV (SimaPro Craft da Pré Sustainability), em articulação com os dados da Ecoinvent versão 3.11. Os processos foram adaptados e aferidos para refletir a realidade nacional (mix energético de Portugal em 2020) provenientes da base de dados ecoinvent 3.11 e os perfis específicos de produção da unidade em análise.

Os dados primários foram verificados por cruzamento com os registos de consumo anual, bem como com a literatura técnica e outros estudos de referência no setor dos materiais siliciosos. Procedeu-se ainda a uma verificação da consistência energética e material, assegurando que os balanços de massa e de energia são coerentes ao longo do sistema.

Este inventário constitui a base quantitativa para a avaliação dos impactes ambientais, permitindo identificar as etapas mais intensivas nos recursos e com maior carga ambiental ao longo da produção da cristobalite como pode ser observado na figura 4.1.

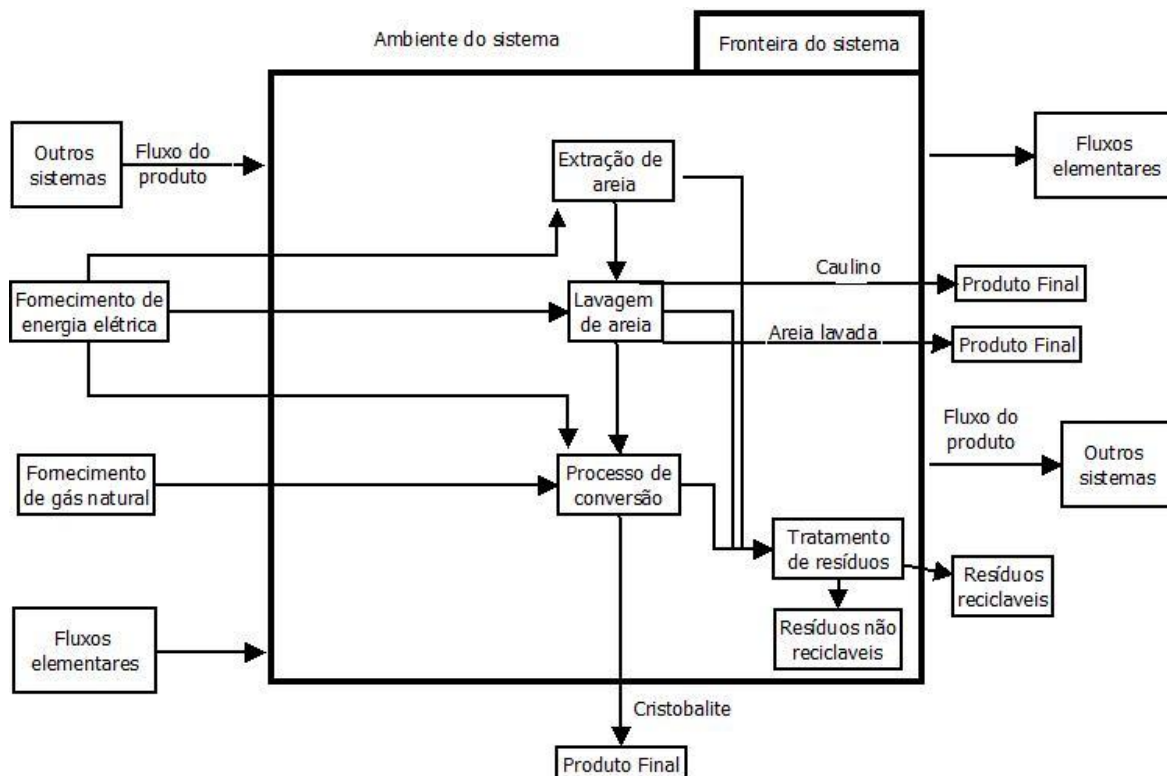


Figura 4.1 - Fluxograma da produção de cristobalite com a definição da fronteira do sistema em estudo.

### 4.3. Avaliação do Inventário do Ciclo de Vida

O ICV assume particular relevância, pois fornece a base quantitativa para a avaliação dos impactos ambientais nas fases subsequentes da ACV. Os dados apresentados resultam de fontes primárias e secundárias com base nos dados reais da empresa SIFUCEL obtidos a partir do histórico de 2022 a 2024 e em alguns casos desde o início da exploração, devidamente referenciadas, e foram modelados recorrendo a software especializado e bases de dados reconhecidas internacionalmente. A estrutura do inventário foi realizada de acordo com as categorias estabelecidas na norma ISO 14040/14044, garantindo a transparência, consistência e reprodutibilidade dos resultados.

A análise dos dados aqui apresentados permitirá, na secção seguinte, proceder à avaliação e interpretação dos impactos ambientais associados à produção de cristobalite, com vista à identificação das oportunidades de melhoria em termos de sustentabilidade e desempenho ambiental.

Os principais fluxos de materiais e energia considerados na fase de extração da areia estão representados na tabela 4.1. Os dados encontram-se expressos em quantidades médias para a produção de 1,08 kg de areia húmida, tendo em conta a duração estimada de utilização dos equipamentos, instalações, e incluem recursos energéticos, materiais virgens e reciclados, bem como a ocupação e transformação do solo.

No que respeita ao consumo energético, foram considerados dois tipos de fontes: energia elétrica da rede e energia elétrica proveniente de painéis fotovoltaicos. A presença de energia solar reflete um esforço de incorporação de energia limpa no processo produtivo, o que poderá ter efeitos positivos nas categorias de impacto relacionadas com alterações climáticas e uso de recursos não renováveis.

Em relação aos materiais, observa-se a inclusão de aço e borracha sintética, quer em forma virgem ou reciclada. O aço apresenta um fluxo positivo relativo ao aço da instalação e um fluxo negativo equivalente para a fração reciclada, o que indica que o material está sujeito a um grande desgaste devido à classificação da areia ser por via húmida, o que provoca a corrosão/degradação precoce do aço. A borracha sintética, com entrada e uma saída equivalente para reciclagem, uma vez que a areia provoca abrasão da mesma, tendo de ser substituída com alguma regularidade. A compensação entre material virgem e reciclado permite reduzir significativamente os impactos ambientais associados à extração e ao processamento de matérias-primas, sobretudo nas categorias como consumo energético, emissões atmosféricas e toxicidade.

A tabela inclui também a ocupação e transformação do solo, representada por dois fluxos: "terreno" e "terreno não utilizado", ambos estimados em valores médios para um período de 21 anos. Estes dados são relevantes para quantificar os impactos associados ao uso do solo e à potencial perda de biodiversidade, ainda que os valores absolutos possuam baixo impacto na ACV da cristobalite.

Entre as matérias-primas virgens, destaca-se o caulino (0,03 kg) que é extraído com a areia, utilizado como matéria-prima secundária no processo produtivo da areia. Quanto à água do lago, trata-se de um recurso hídrico cuja utilização é tida em conta como cálculo a partir de dados de consumo médio anual 2022-2024, contribuindo para a avaliação da pegada hídrica do processo.

Tabela 4.1 - Inventário do processo de extração de areia para 1 kg de cristobalite.

Fluxos	Quantidades		Unidades	Estimativa
	Entradas	Saídas		
Energia elétrica	9,95E-6	---	MJ	Calculado a partir de dados de consumo médio anual 2022-2024
Energia elétrica proveniente de painéis fotovoltaicos	5,24E-7	---	MJ	Calculado a partir de dados de consumo médio anual 2022-2024
Aço	1,07E-5	---	kg	Média de consumo anual (estimativa de 20 anos de tempo de vida)
Aço para reciclagem	---	1,07E-5	kg	Calculado a partir de dados de consumo médio anual 2022-2024 Reciclável ( <i>cut-off</i> )
Borracha sintética	9,52E-7	---	kg	Média de consumo anual (estimativa de 30 anos de tempo de vida)
Borracha para reciclagem	---	9,52E-7	kg	Média anual (13,6 kg borracha/m) Calculado a partir de dados de consumo médio anual 2022-2024 Reciclável ( <i>cut-off</i> )
Transformação do solo (prado)	1,12E-5	---	m <sup>2</sup>	Média anual (21 anos de exploração)
Ocupação do solo (prado)	1,12E-5	---	m <sup>2</sup> a	Média anual (21 anos de exploração)
Caulino (recurso não renovável)	0,03	---	kg	Calculado a partir de dados de consumo médio anual 2022-2024
Areia (recurso não renovável)	1,00	---	kg	---
Transformação do solo para extração de mineral	1,12E-5	---	m <sup>2</sup>	Calculado a partir de dados de consumo médio anual 2022-2024
Água do lago	3,00E-5	---	m <sup>3</sup>	Calculado a partir de dados de consumo médio anual 2022-2024
Areia siliciosa (0/2mm)	---	1,08	kg	Calculado a partir de dados de consumo médio anual 2022-2024

Fluxos	Quantidades		Unidades	Estimativa
	Entradas	Saídas		
Água do lago	---	2,50E-5	m <sup>3</sup>	Calculado a partir de dados de consumo médio anual 2022-2024

A areia foi contabilizada como um recurso não renovável, com uma entrada de 1,0 kg. Apesar da sua importância no processo produtivo, a areia extraída é classificada na categoria de Uso de recurso mineral com um fator de caracterização nulo uma vez que a areia é considerada um material de origem natural amplamente disponível e não sujeito a processos de transformação para a sua extração de acordo com a base de dados Ecoinvent 3.11. Foi contabilizado o consumo de água do lago uma vez que é necessária a água para extrair a areia do lago, que no final do processo de extração cerca de 83% retorna ao lago, como pode ser observado na tabela 4.1.

O processo de lavagem constitui uma das etapas intermédias no sistema de produção de cristobalite e envolve fluxos de energia, água e, potencialmente, materiais auxiliares. Com base na tabela 4.2 de inventário considerada, é possível identificar os principais consumos e emissões associados a esta fase, permitindo a sua quantificação e integração na ACV.

Em termos energéticos, o processo de lavagem utiliza energia elétrica da rede e energia elétrica proveniente de painéis fotovoltaicos. Estes valores médios anuais refletem o consumo necessário para operar os equipamentos de lavagem (como bombas, telas transportadoras, ou sistemas de filtragem), com um contributo positivo da energia solar para reduzir a dependência das fontes fósseis.

Um dos recursos mais diretamente implicados na lavagem é a água, representada por um fluxo de água do lago.

No que se refere à ocupação do solo, não há necessidade de novas edificações nem de alterações na implantação ou dimensões dos edifícios existentes, não se prevendo efeitos relevantes decorrentes da etapa de lavagem da areia.

**Tabela 4.2 - Inventário do processo de lavagem de areia para a produção de 1 kg de cristobalite.**

Fluxos	Quantidades		Unidades	Estimativa
	Entradas	Saídas		
Edifícios (aço)	1,23E-8	---	m <sup>2</sup>	Calculado
Correias transportadoras	1,29E-8	---	m	Calculado (180 m, 20 anos)
Energia elétrica	4,37E-5	---	MJ	Calculado a partir de dados de consumo médio anual 2022-2024
Energia elétrica proveniente de painéis fotovoltaicos	2,3E-6	---	MJ	Calculado a partir de dados de consumo médio anual 2022-2024

Fluxos	Quantidades		Unidades	Estimativa
	Entradas	Saídas		
Areia siliciosa (0/2mm)	1,08	---	kg	Calculado a partir de dados de consumo médio anual 2022-2024
Aço para reciclagem	---	3,62E-5	kg	Calculado a partir de dados de consumo médio anual 2022-2024 Reciclável ( <i>cut-off</i> )
Aço da lavagem	3,62E-5	---	kg	Média de consumo anual (20 anos)
Borracha para reciclagem	---	9,52E-7	kg	Média anual (13,6 kg borracha/m) Calculado a partir de dados de consumo médio anual 2022-2024 Reciclável ( <i>cut-off</i> )
Água	5,00E-5	---	m <sup>3</sup>	Calculado a partir de dados de consumo médio anual 2022-2024
Caulino (co-produto)	---	0,03	kg	Calculado a partir de dados de consumo médio anual 2022-2024
Areia siliciosa lavada (0/2mm)	---	1,05	kg	Calculado a partir de dados de consumo médio anual 2022-2024
Águas residuais / escorrências	---	4,00E-5	m <sup>3</sup>	Calculado a partir de dados de consumo médio anual 2022-2024
Água	---	1,00E-5	m <sup>3</sup>	Calculado a partir de dados de consumo médio anual 2022-2024

Nas saídas do processo de lavagem de areia os fluxos materiais e hídricos resultantes desta operação, são assumidos em termos do cálculo de médias anuais. Este processo, visa remover impurezas e separar a areia para posterior transformação térmica.

No final no processo de lavagem obtêm-se dois produtos comercializáveis, caulino e areia lavada. A areia siliciosa lavada (fração 0/2 mm) pode ser reencaminhada para a produção da cristobalite e pode ser vendida diretamente sem nenhuma transformação, tipicamente para a indústria do vidro e construção civil e fundição. Embora diretamente relacionada com a lavagem em termos operacionais, a produção de caulino, não foi considerada uma vez que se trata de matéria-prima para a indústria cerâmica e porcelânica, dado que se trata de um subproduto comercializável, aplicou-se a alocação em massa devido a não ser o foco do presente estudo.

O caulino é um material argiloso, presente na areia natural, é removido durante o processo por via da suspensão em água e posterior sedimentação. Apesar da sua quantidade reduzida, o caulino representa um produto de valorização.

Do ponto de vista hídrico, destacam-se dois fluxos. Apesar das quantidades serem baixas, estes fluxos foram contabilizados por forma a garantir a rastreabilidade e transparência do estudo como pode ser observado na tabela 4.2.

A etapa de conversão térmica na cristobalite representa uma das fases mais intensivas no consumo de energia e materiais do sistema produtivo analisado, envolvendo um conjunto diversificado de fluxos de entrada que contribuem diretamente para a performance ambiental do processo. A tabela 4.3 apresentada permite identificar e quantificar esses fluxos com base no cálculo das médias anuais, fornecendo uma base sólida para a ACV.

Em termos de infraestrutura física, o processo possui edifícios com estrutura em aço, onde a área foi calculada especificamente para este inventário. Este valor, embora baixo, traduz o contributo da construção civil no impacto total do sistema, sobretudo ao nível de uso de materiais metálicos e ocupação do solo.

Os consumos energéticos assumem particular destaque, com valores elevados de calor proveniente do gás natural para fornos industriais (>100 kW), estimado em 2,27 MJ/kg de cristobalite. Este fluxo é responsável por grande parte da energia térmica necessária à transformação da areia siliciosa em cristobalite, sendo também um dos principais vetores de emissão de gases com efeito de estufa, dada a origem fóssil do combustível. Complementarmente, o processo consome energia elétrica da rede e energia elétrica proveniente de painéis fotovoltaicos, evidenciando uma tentativa de integrar fontes renováveis no sistema. A eletricidade é utilizada tanto nos equipamentos de controlo de temperatura e transporte de materiais, como nos sistemas auxiliares.

A matéria-prima principal é a areia siliciosa lavada e preparada. Associado ao tratamento térmico da areia, verifica-se o uso de hidróxido de sódio (NaOH a 50%). Este reagente desempenha um papel importante onde atua como agente fundente - ou seja, reduz o ponto de fusão local do sistema, facilitando a cristalização da cristobalite a temperaturas mais baixas do que seriam necessárias na areia pura. Isto melhora a eficiência energética do processo.

Do ponto de vista de materiais auxiliares e manutenção, identificam-se fluxos como correias de borracha, lubrificantes e outros lubrificantes não especificados com valor idêntico. Estes são necessários para o funcionamento contínuo dos equipamentos.

O embalamento do produto final é assegurada por cartão e filme de polietileno.

Os materiais metálicos incluem o aço, com um contributo estimado para uma duração de 20 anos, o que indica um rastreio temporal de impacto associado à durabilidade da infraestrutura e equipamentos. Importa notar ainda os fluxos de resíduos e materiais recicláveis, correspondentes à valorização de resíduos ou materiais enviados para reciclagem: aço para reciclagem, borracha para reciclagem, e resíduos industriais. Os materiais recicláveis foram

considerados para incluir os processos de tratamento de reciclagem, assumindo que os materiais recicláveis substituem equivalentes primários no mercado, contribuindo assim para a economia circular e mitigando os impactos do sistema. Os resíduos foram reencaminhados para os devidos tratamentos como resíduos sólidos urbanos. A inclusão do tratamento dos resíduos foi efetuada numa visão do poluidor pagador.

A entrada de água completa o inventário desta etapa, representando um uso adicional de recursos hídricos no processo, embora em volume relativamente reduzido, ver Tabela 4.3. Esta água está associada ao arrefecimento, humedificação de materiais e controlo térmico.

Tabela 4.3 - Inventário do processo de processo de conversão em 1 kg cristobalite.

Fluxos	Quantidades		Unidades	Estimativa
	Entradas	Saídas		
Edifícios (aço)	2,70E-6	---	m <sup>2</sup>	Calculado
Cartão (embalagem)	4,69E-5	---	kg	Calculado a partir de dados de consumo médio anual 2022-2024
Correias borracha	2,26E-7	---	m	Calculado (180 m, 20 anos)
Diesel (máquinas)	4,99E-4	---	MJ	Calculado a partir de dados de consumo médio anual 2022-2024
Energia elétrica	7,95E-5	---	MJ	Calculado a partir de dados de consumo médio anual 2022-2024
Energia elétrica proveniente de painéis solares	4,03E-6	---	MJ	Calculado a partir de dados de consumo médio anual 2022-2024
Calor (Gás natural) >100kW	2,27	---	MJ	Calculado a partir de dados de consumo médio anual 2022-2024
Lubrificante (massa lubrificante)	1,09E-5	---	kg	Calculado a partir de dados de consumo médio anual 2022-2024
Lubrificante (não especificado)	1,09E-5	---	kg	Calculado a partir de dados de consumo médio anual 2022-2024
Filme de Polietileno (Embalagem)	1,86E-5	---	kg	Calculado a partir de dados de consumo médio anual 2022-2024
Areia siliciosa lavada (0/2mm)	1,05	---	kg	Calculado a partir de dados de consumo médio anual 2022-2024
Hidróxido de Sódio (50%)	2,86E-4	---	kg	Calculado a partir de dados de consumo médio anual 2022-2024
Aço	1,07E-5	---	kg	Média de consumo anual (estimativa para 20 anos de duração)
Resíduos industriais	---	6,55 E-5	kg	Calculado a partir de dados de consumo médio anual 2022-2024
Aço para reciclagem	---	1,07E-5	kg	Calculado a partir de dados de consumo médio anual 2022-2024 Reciclável ( <i>cut-off</i> )
Borracha para reciclagem	---	3,07E-7	kg	13,6kg borracha/m Calculado a partir de dados de consumo médio anual 2022-2024 Reciclável ( <i>cut-off</i> )
Água	1,00E-5	---	m <sup>3</sup>	Calculado a partir de dados de consumo médio anual 2022-2024
Cristobalite	---	1,00	kg	Calculado a partir de dados de consumo médio anual 2022-2024
Água	---	6E-5	m <sup>3</sup>	Calculado a partir de dados de consumo médio anual 2022-2024

#### 4.4. Avaliação de impacto do ciclo de vida

A Avaliação de Impacte do Ciclo de Vida (Life Cycle Impact Assessment – LCIA) constitui uma etapa fundamental da ACV, permitindo a conversão do inventário de fluxos de entrada e saída em categorias de impacto ambiental quantificáveis. Nesta fase, os dados recolhidos no ICV foram classificados, caracterizados e agregados segundo modelos reconhecidos, nomeadamente Environmental Footprint 3.1, com o objetivo de avaliar os potenciais impactes ambientais associados à produção de cristobalite.

A LCIA proporciona uma importante compreensão ambiental dos diferentes fluxos de materiais e energia, contribuindo para a identificação dos principais vetores de impacto. Esta etapa foi essencial para suportar as decisões fundamentais nos contextos de melhoria de desempenho ambiental, inovação tecnológica e desenvolvimento de estratégias de sustentabilidade.

Com base nos dados do ICV, procedeu-se à classificação dos fluxos quantificados em categorias de impacto ambiental.

Neste capítulo, são apresentados os métodos e modelos utilizados para a avaliação de impactos, bem como as categorias selecionadas, justificando-se a sua relevância para o caso em análise.

Os fluxos elementares recolhidos do ICV podem ser classificados nas seguintes categorias de impacto ambiental:

- Acidificação;
- Alterações climáticas – total;
  - Alterações climáticas – Biogénicas;
  - Alterações climáticas – Fósseis;
  - Alterações climáticas – Uso e alteração do uso da terra;
- Ecotoxicidade, água doce;
  - Ecotoxicidade, água doce – inorgânicos;
  - Ecotoxicidade, água doce – orgânicos;
- Eutrofização, água doce;
- Eutrofização marinha;
- Eutrofização, terrestre;
- Toxicidade humana, cancerígenos – total;
  - Toxicidade humana, cancerígenos - inorgânicos;
  - Toxicidade humana, cancerígenos - compostos orgânicos;
- Toxicidade humana, não cancerígenos – total;
  - Toxicidade humana, não cancerígenos - compostos inorgânicos;
  - Toxicidade humana, não cancerígenos - compostos orgânicos;
- Radiação ionizante, saúde humana;
- Uso do solo;
- Destruição da camada de ozono;
- Material particulado;
- Formação fotoquímica de ozono - saúde humana;
- Utilização de recursos, fósseis;

- Utilização de recursos, minerais e metais;
- Uso da água.

Procedeu-se à identificação e análise das categorias de impacto, tendo as três primeiras assumido maior representatividade. As duas subsequentes evidenciaram-se como relevantes no âmbito do estudo da cristobalite, mantendo-se, porém, dentro do mesmo limiar de significância das restantes categorias como pode ser observado na figura 4.2:

- Utilização de recursos, fósseis;
- Alterações climáticas – total;
- Formação fotoquímica de ozono - saúde humana;
- Toxicidade humana, cancerígenos – total;
- Ecotoxicidade, água doce.

Estas categorias foram selecionadas por refletirem de forma abrangente os maiores impactos na produção da cristobalite para o meio ambiente e para a saúde humana, nomeadamente a Toxicidade humana e a ecotoxicidade. Essas duas categorias foram consideradas importantes porque a toxicidade humana reflete o risco direto para trabalhadores, sendo uma escolha realizada com base na experiência e escolha pessoal do autor, de modo a assegurar a segurança e saúde das partes interessadas relevantes, enquanto a ecotoxicidade água doce evidencia o risco indireto sobre o ambiente através da contaminação hídrica, uma vez que a extração é efetuada num lago. Juntas, ajudam a avaliar alguns dos impactos mais críticos da cristobalite na saúde e no ambiente.

A avaliação de impactos ambientais foi realizada com base na metodologia Environmental Footprint 3.1 (EF 3.1), desenvolvida pela Comissão Europeia, a qual permite a quantificação e categorização dos impactos ao longo do ciclo de vida, considerando um conjunto abrangente das categorias apresentadas anteriormente. Para facilitar a interpretação e comparação entre categorias, os resultados foram normalizados através da utilização da unidade Pessoa Equivalente (PEq), que corresponde ao impacto ambiental médio anual gerado por um cidadão da União Europeia. Este procedimento permite expressar os principais impactos do sistema avaliado em termos relativos, indicando, por exemplo, quantas vezes um determinado impacto equivale ao impacto médio anual de uma pessoa para uma dada categoria. A normalização, ao converter diferentes unidades para uma métrica comum, proporciona uma base consistente para identificar as categorias de impacto mais relevantes e priorizar medidas de mitigação.

No Anexo A, são disponibilizadas as tabelas com os resultados da normalização com a metodologia de avaliação de impacto (Environmental Footprint 3.1) estando englobado desde a extração, lavagem e processo de conversão em cristobalite.

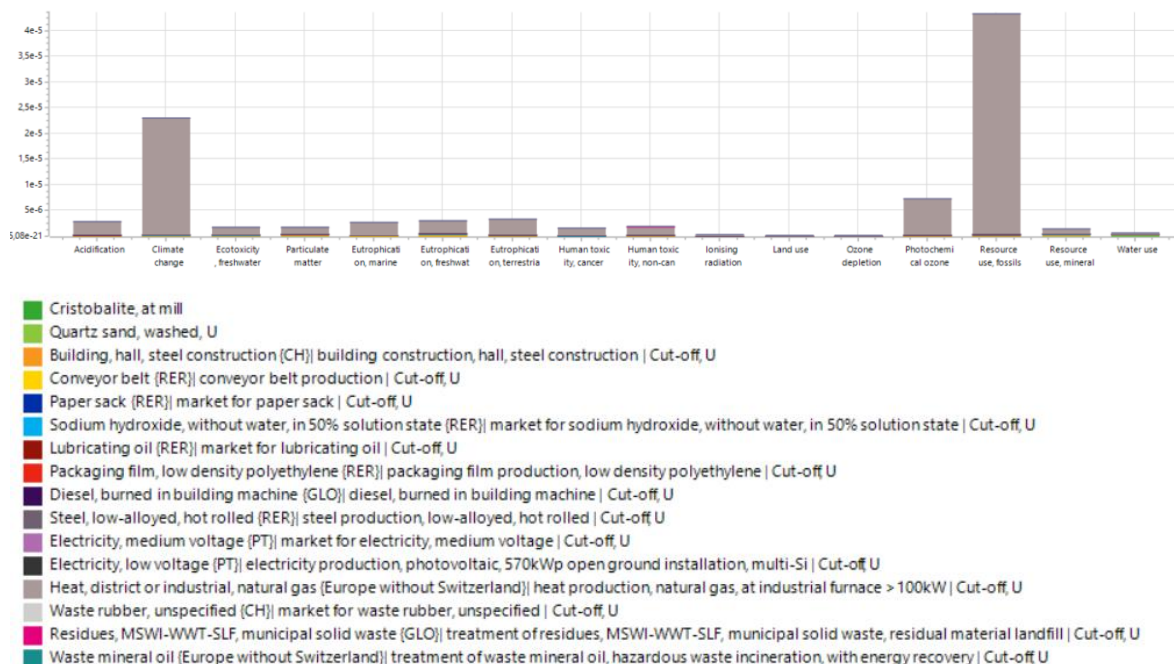


Figura 4.2 - Resultados de Normalização das categorias de impacte ambiental pela metodologia Environmental Footprint, apenas para comparação entre as várias categorias.

Na figura 4.2, pode-se observar as categorias com maior impacte ambiental, e consequentemente consideradas com maior relevância para o presente estudo:

- **Utilização de recursos, fósseis**

A produção de cristobalite envolve a calcinação de areia siliciosa (SiO<sub>2</sub>) a temperaturas elevadas, o que requer uma quantidade substancial de energia térmica (representa aproximadamente 99%) como pode ser observado na tabela 4.4. Esta energia é provida por combustíveis fósseis (gás natural), cujas cadeias de abastecimento contribuem de forma direta para o impacte nesta categoria.

Além disso, a utilização de aço e de hidróxido de sódio para a produção de cristobalite complementam este impacte, cerca de 0,4%.

Tabela 4.4 - Utilização de recursos fósseis (>0,2%).

	Produção de calor, gás natural, em forno industrial >100kW (conversão)	Aço, baixa liga, laminado a quente (extração, lavagem e conversão)	Hidróxido de sódio, sem água, em solução a 50% (conversão)
MJ	2,79	0,0056	0,0043
%	99	0,2	0,2

A utilização do gás natural 36 MJ por m<sup>3</sup> agrega ainda o consumo de petróleo bruto (recurso) corresponde a 2,1%, o carvão mineral (recurso) corresponde a 1,3%, urânio (recurso) cerca de 0,9%, a Lignite ou lenhite corresponde a 0,3%, o processo de extração de carvão corresponde a 0,02%, o peat corresponde a 0,001%.

○ **Alterações Climáticas – total**

As alterações climáticas estão fortemente relacionadas com a utilização de recursos fósseis. A principal contribuição para as alterações climáticas encontra-se associada à combustão do gás natural utilizada na fase do processo de conversão da areia siliciosa, etapa crítica para a obtenção da cristobalite como pode ser observado na tabela 4.5, onde representa 99% dos potenciais impactos das alterações climáticas. A queima de gás natural emite diretamente CO<sub>2</sub> para a atmosfera, sendo esta a principal fonte de emissão de gases com efeito de estufa associada ao sistema em análise. O aço utilizado na construção civil, como os pavilhões também geram emissões indiretas, contribuindo para o total de emissões, cerca de 1%.

Tabela 4.5 - Alterações climáticas - total (>0,2%).

	Construção civil, pavilhões, construção em aço (lavagem e conversão)	Produção de calor, gás natural, em forno industrial >100kW (conversão)	Aço, baixa liga, laminado a quente (extração, lavagem e conversão)	Correias transportadoras (conversão)	Hidróxido de sódio, sem água, em solução a 50% (conversão)
kg CO <sub>2</sub> eq.	1,04E-03	1,71E-01	5,08E-04	3,18E-04	2,61E-04
%	0,6	99	0,3	0,2	0,2

As emissões inorgânicas para a atmosfera, nomeadamente o dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) representa 92% do total de impactos nesta categoria. As emissões orgânicas para a atmosfera (grupo VOC), nomeadamente o metano, representa 8% das emissões.

○ **Formação fotoquímica de ozono – saúde humana**

No contexto da produção de cristobalite, conforme indicado na Tabela 4.6, a categoria formação fotoquímica de ozono – saúde humana, avaliada em kg NMVOC eq., evidencia que a produção de calor a partir de gás natural, associada ao processo de produção de cristobalite, é o fator de maior relevância, representando aproximadamente 97% do impacto total. Esta predominância decorre das emissões de óxidos de azoto (NO<sub>x</sub>) e compostos orgânicos voláteis não metânicos (NMVOC), resultantes da combustão de combustíveis fósseis, que são os principais precursores da formação de ozono troposférico. Em segundo lugar, destaca-se o contributo da construção civil com o aço dos edifícios, com cerca de 1,5%.

Estes resultados demonstram que a etapa energética, particularmente a térmica, é o impulsionador desta categoria de impacto, sendo determinante na definição de estratégias de redução.

A relevância desta categoria no contexto da Avaliação de Ciclo de Vida (ACV) está diretamente ligada aos efeitos adversos do ozono troposférico na saúde humana, nomeadamente o aumento da incidência de doenças respiratórias, crises asmáticas e efeitos cardiovasculares, bem como a degradação da qualidade do ar nas áreas urbanas. Assim, a análise da Tabela 4.7 confirma a necessidade de integrar políticas energéticas e tecnológicas de descarbonização no setor produtivo da cristobalite, considerando que as emissões precursoras de ozono, mesmo em pequenas concentrações, têm um impacto potencial significativo quando analisadas no horizonte de todo o ciclo de vida do produto.

Estes valores sugerem que a fase de combustão no processo de produção de cristobalite tem um impacto significativamente maior que no consumo de eletricidade.

Tabela 4.6 - Formação fotoquímica de ozono - saúde humana (>0,2%).

	Areia siliciosa especial (extração, lavagem e conversão)	Construção civil, pavilhões, construção em aço (conversão)	Correias transportadoras (conversão)	Hidróxido de sódio, sem água, em solução a 50% (conversão)	Gasóleo (conversão)	Aço, baixa liga, laminado a quente (extração, lavagem e conversão)	Calor, gás natural, em forno industrial >100kW (conversão)
kg NMVOC eq.	4,83E-07	4,36E-06	1,06E-06	7,21E-07	3,42E-07	3,27E-07	6,85E-07
%	0,2	1,5	0,4	0,2	0,2	0,6	96,6

A formação de ozono troposférico resulta da reação de óxidos de azoto (NO<sub>x</sub>) e compostos orgânicos voláteis (COVs) na presença de radiação solar. Estes compostos podem ser emitidos:

- Durante a combustão de combustíveis fósseis;
- A partir de processos de secagem.

Este tipo de poluição atmosférica contribui para a degradação da qualidade do ar e está associada a efeitos respiratórios adversos.

Tabela 4.7 - Ponderação das substâncias poluentes na produção de cristobalite (&gt;1%).

Substância	Compartimento	Total (%)
NMVOC, compostos orgânicos voláteis não metânicos	Ar	50
Óxidos de azoto	Ar	44
Metano, fóssil	Ar	2
Dióxido de enxofre	Ar	1
Monóxido de carbono, fóssil	Ar	1
Pentano	Ar	1
Etano	Ar	1
Butano	Ar	1

A formação de ozono troposférico (ozono ao nível do solo), com implicações para a saúde humana, é provocada por emissões de compostos orgânicos voláteis não metânicos (NMVOC) e NO<sub>x</sub>. As emissões de NMVOC não especificados representam 49,6%, enquanto os NO<sub>x</sub> representam 43,8%, como pode ser observado na tabela 4.7. Estes poluentes são emitidos principalmente durante a combustão do gás natural, bem como durante a produção de eletricidade, sobretudo quando esta é gerada a partir de fontes fósseis. Ambos os processos libertam precursores de ozono que, sob ação da radiação solar, promovem reações fotoquímicas na atmosfera, resultando na formação de ozono nocivo.

Embora em menor proporção, outros compostos fósseis como metano (1,5%), dióxido de enxofre (1,2%), e monóxido de carbono (1,1%) também participam neste processo. O metano, apesar da sua contribuição relativamente modesta neste contexto, tem elevada relevância para escalas temporais e espaciais mais amplas pela sua persistência atmosférica. O dióxido de enxofre, além do papel indireto na formação de ozono, constitui precursor de partículas secundárias com efeitos respiratórios significativos. Já o monóxido de carbono participa como agente redutor, promovendo reações que aumentam a disponibilidade de radicais livres na atmosfera e, conseqüentemente, intensificam a formação de ozono.

Outros hidrocarbonetos voláteis de menor peso percentual, como pentano (0,7%), etano (0,7%), butano (0,6%), propano (0,3%), tolueno (0,2%), benzeno (0,1%) e formaldeído (0,1%), contribuem cumulativamente para a carga fotoquímica. Apesar do seu valor percentual reduzido, muitos destes compostos apresentam elevada toxicidade intrínseca, sendo alguns classificados como cancerígenos (como o benzeno e o formaldeído), o que reforça a sua relevância em termos de saúde humana.

A elevada concentração de NMVOC e NO<sub>x</sub> observada neste contexto indica um risco ambiental e sanitário que deve ser controlado através da adoção de medidas de mitigação. Entre estas medidas incluem-se a melhoria da eficiência energética, a substituição de combustíveis fósseis por alternativas mais limpas, a captura de compostos voláteis durante os processos industriais. O controlo da emissão dos óxidos de azoto faz-se através de técnicas alternativas que incluem: medidas primárias com modificações no processo de queima de forma a baixar a temperatura da chama e injeção de compostos de azoto reduzido, para redução do NO a N<sub>2</sub> (Redução Não-Catalítica Seletiva - SNCR e Redução Seletiva Catalítica

- SCR). A redução não-catalítica do NOx a N<sub>2</sub> (SNCR) obtém-se por injeção de amónia, ureia, ou outro composto reduzido de azoto, na emissão de gases do forno. Uma técnica alternativa, menos utilizada, consiste na redução do NOx pelo NH<sub>3</sub>, de uma forma catalítica, a temperaturas de 300-400 °C, sobre a superfície de um catalisador (Sistema SCR).

○ **Toxicidade humana, cancerígenos – total**

A Toxicidade foi considerada uma categoria importante uma vez que o calor produzido pelo consumo de gás natural no processo de conversão corresponde a 82% da toxicidade humana, cancerígenos, seguido do hidróxido de sódio, em solução, corresponde a 8%, o tratamento de resíduos corresponde a 3%, a produção de aço, baixa liga, laminado a quente equivalente a 2,6% desde a extração até ao processo de conversão. A construção civil, nomeadamente dos pavilhões de construção de aço no processo de conversão em cristobalite equivalem a 2,5%. As correias transportadoras no processo de cristobalite correspondem a 1,4%. A areia siliciosa especial desde a extração até ao processo de conversão corresponde a 0,6%. Como pode ser observado na tabela 4.8.

Tabela 4.8 - Toxicidade humana, cancerígenos – total (>0,2%).

	Areia siliciosa especial (extração, lavagem e conversão)	Construção civil, pavilhões, construção em aço (conversão)	Correias transportadoras (conversão)	Hidróxido de sódio, sem água, em solução a 50% (conversão)	Aço, baixa liga, laminado a quente (extração, lavagem e conversão)	Produção de calor, gás natural, em forno industrial >100kW (conversão)	Tratamento de resíduos (conversão)
CTUh	1,70E-13	6,79E-13	3,85E-13	2,07E-12	6,93E-13	2,20E-11	8,07E-13
%	0,6	2,5	1,4	7,7	2,6	81,9	3,0

Durante o processo de produção de cristobalite (conversão), mais concretamente na fase de calcinação da areia, podem ocorrer emissões poluentes resultantes da utilização de combustíveis fósseis, como o gás natural. Entre os poluentes libertados destacam-se compostos altamente tóxicos, tal como pode ser observado na tabela 4.9.

Tabela 4.9 - Ponderação das substâncias poluentes na produção de cristobalite (>1%).

Substância	Compartimento	Total (%)
Dioxina, 2,3,7,8 Tetraclorodibenzo-p-	Água	48
Formaldeído	Ar	24
Benzo(a)pireno	Ar	9
Crómio (VI)	Água	7
Mercúrio (II)	Ar	3
Níquel (II)	Ar	2
Benzeno	Ar	2
Arsénio	Água	1

Substância	Compartimento	Total (%)
Dioxina, 2,3,7,8 Tetraclorodibenzo-p-	Ar	1
Dibenz(a,h)antraceno	Ar	1
Arsénio	Ar	1
Benzo(b)fluoranteno	Ar	1

A substância com maior relevância é a dioxina 2,3,7,8-TCDD, responsável por cerca de 48% do impacto total. Trata-se de um composto extremamente tóxico, persistente e bioacumulativo, classificado como carcinogénico do Grupo 1 pela IARC, estando associado a neoplasias do fígado, linfomas e sarcomas, bem como a efeitos extra-cancerígenos como disfunções hormonais, imunossupressão e malformações congénitas (IARC, 2025). Em segundo lugar surge o formaldeído, com 24%, um agente cancerígeno também do Grupo 1, particularmente associado a cancro nasofaríngeo e leucemias, além de irritações respiratórias crónicas nos contextos ocupacionais e ambientes interiores. Segue-se o benzo(a)pireno, com 9%, um hidrocarboneto aromático policíclico resultante de processos de combustão, com reconhecida relação causal com cancro do pulmão, pele e bexiga. O crómio (VI), com 7%, constitui igualmente um agente altamente cancerígeno, sobretudo por via inalatória, estando fortemente associado ao cancro do pulmão e a efeitos tóxicos adicionais como lesões cutâneas e insuficiência renal. Substâncias como o mercúrio (II), ainda que com menor peso percentual (3%), apresentam elevada toxicidade sistémica, com particular impacto neurotóxico e risco elevado para o desenvolvimento fetal, apesar de uma menor evidência na carcinogénese. O níquel (II) (2%) e o benzeno (2%) reforçam a contribuição global para o risco cancerígeno, estando o primeiro ligado a neoplasias do pulmão e seios nasais, e o segundo fortemente associado a leucemias e toxicidade medular. O arsénio, presente com cerca de 1%, mantém relevância devido à sua capacidade de induzir cancro cutâneo, pulmonar e da bexiga, além de efeitos crónicos sistémicos. Finalmente, compostos como o dibenz(a,h)antraceno e o benzo(b)fluoranteno, também hidrocarbonetos aromáticos policíclicos, contribuem marginalmente (1% cada) mas são igualmente classificados como cancerígenos (IARC, 2025).

No que diz respeito à qualidade do ar ao nível do solo, especialmente nas áreas urbanas próximas das unidades de produção, o formaldeído é responsável por 24% das emissões atmosféricas registadas, constituindo como outro agente preocupante devido ao seu potencial impacto na saúde humana.

Quanto às emissões para o meio hídrico, em particular para águas doces, verifica-se a presença de compostos orgânicos, incluindo substâncias orgânicas halogenadas. Destaca-se, neste grupo, a dioxina policlorada 2,3,7,8-tetraclorodibenzo-p-dioxina (2,3,7,8-TCDD), considerada uma das substâncias mais tóxicas conhecidas, a qual representa 49% das emissões orgânicas halogenadas para águas doces.

Apesar do gás natural ser considerado uma fonte de energia “mais limpa” comparativamente a outros combustíveis fósseis, a sua combustão em condições industriais pode gerar compostos orgânicos tóxicos.

○ **Ecotoxicidade, água doce**

Com base na tabela 4.10, referente à ecotoxicidade na água doce, observa-se que o impacto ambiental está maioritariamente concentrado em algumas etapas específicas do Ciclo de Vida da cristobalite. A fase que mais contribui para este impacto é a produção de calor através da combustão de gás natural no forno industrial, com 82% do total. Este valor reflete o peso significativo da utilização de gás natural, que libertam substâncias tóxicas com potencial de afetar negativamente os ecossistemas aquáticos.

Segue-se a construção civil, nomeadamente as estruturas de aço, representam 8% do impacto.

Tabela 4.10 - Ecotoxicidade, água doce (>0,2%).

	Areia siliciosa especial (extração, lavagem e conversão)	Construção civil, pavilhões, construção em aço (conversão)	Correias transportadoras (conversão)	Embalagem de papel (conversão)	Hidróxido de sódio, sem água, em solução a 50% (conversão)	Filme de embalagem, polietileno de baixa densidade (conversão)	Aço, baixa liga, laminado a quente (extração, lavagem, conversão)	Calor, gás natural, em forno industrial >100kW (conversão)	Tratamento de resíduos (conversão)
CTUe	8,93E-04	8,09E-03	2,06E-03	3,02E-04	2,93E-03	3,47E-04	3,43E-03	8,31E-02	2,72E-04
%	0,9	8,0	2,0	0,3	2,9	0,3	3,4	81,8	0,3

O impacto nesta categoria pode estar associado a:

- Consumo energia elétrica e gás natural;
- Produção de aço.

Mesmo pequenas quantidades de poluentes com elevada persistência ou toxicidade ecológica podem gerar um impacto desproporcionado nestas categorias como se pode verificar na tabela 4.11.

Tabela 4.11 - Ponderação das substâncias poluentes na produção de cristobalite (>1%).

Substância	Compartimento	Total (%)
Estrôncio (II)	Água	24
Cloreto	Água	22
Sulfureto de hidrogénio	Água	15
Alumínio (III)	Solo	7
Ferro, ião	Solo	6
Ferro, ião	Água	5
Cloro	Água	4
Hidrocarbonetos aromáticos	Água	2
Bário (II)	Solo	2
Sulfureto de hidrogénio	Ar	2
Bário (II)	Água	1
HAP, hidrocarbonetos aromáticos policíclicos	Água	1

Substância	Compartimento	Total (%)
NMVOC, compostos orgânicos voláteis não metânicos	Ar	1
Alumínio (III)	Ar	1
Amônio, íon	Água	1
Alumínio (III)	Água	1
Bromo	Água	1

A substância com a contribuição mais expressiva é associada ao estrôncio (II) em água, responsável por 23,7% do total. Este resultado evidencia a relevância deste elemento no contexto de toxicidade aquática, possivelmente em função da sua persistência e potencial de bioacumulação em organismos aquáticos.

Na sequência, o cloreto ( $\text{Cl}^-$ ) em água apresenta contribuição de 21,6%, o que sugere que concentrações elevadas de sais podem exercer stress osmótico significativo sobre espécies aquáticas, alterando a homeostase e levando à redução da biodiversidade nos ambientes expostos. Já o sulfureto de hidrogênio ( $\text{H}_2\text{S}$ ) na água aparece como o terceiro composto mais impactante (14,9%), cuja toxicidade é conhecida por afetar processos respiratórios nos organismos aquáticos, devido à sua interferência direta com o transporte de oxigênio.

O alumínio (III) no solo contribui com 7,2%, indicando possível lixiviação e transporte para corpos d'água, com efeitos tóxicos principalmente em peixes e macroinvertebrados, especialmente sob condições de pH ácido. O ferro (II e III), considerando as ocorrências no solo e em água, soma aproximadamente 10,5% do total (5,6% para ferro no solo e 4,9% para ferro na água). Embora o ferro seja um elemento essencial em baixos níveis, com concentrações elevadas pode causar precipitação nas brânquias dos peixes, resultando nos efeitos letais ou subletais.

O cloro molecular ( $\text{Cl}_2$ ) na água contribui com 4,2%, refletindo seu elevado potencial de toxicidade direta para organismos aquáticos, além de sua capacidade de gerar subprodutos tóxicos na água. Outras substâncias, como hidrocarbonetos aromáticos, bário (II), PAHs e NMVOC, apresentam participações menores ( $\leq 2\%$ ), mas não devem ser desconsideradas, pois podem atuar de forma cumulativa ou sinérgica no ecossistema aquático, aumentando a pressão ecotóxica total.

A origem provável destas emissões está associada à combustão de gás natural utilizada na produção de calor, bem como à produção e transformação de aço, ambas etapas com elevado contributo para a pegada ambiental da cristobalite. Estes processos industriais libertam poluentes atmosféricos que, por deposição ou descarga indireta, acabam por atingir as linhas de água.

#### 4.4.1. Análise e discussão dos resultados

A avaliação dos resultados relativos à produção de cristobalite demonstra que o processo de calcinação da areia siliciosa, sustentado energeticamente pela combustão de gás natural, constitui o eixo central dos impactos ambientais em praticamente todas as categorias

analisadas. Esta etapa crítica do ciclo de vida não apenas determina a intensidade do consumo energético, como também gera um conjunto diversificado de poluentes atmosféricos e aquáticos, com relevância tanto ao nível da saúde humana como dos ecossistemas.

No domínio das alterações climáticas, o dióxido de carbono é a principal emissão identificada, resultante da oxidação completa do metano presente no gás natural. A sua contribuição é ampliada pela presença do metano residual não queimado, um gás com elevado potencial para o aquecimento global, cuja libertação durante processos de combustão incompleta ou fugas no transporte constitui uma agravante adicional. Esta dupla pressão - emissões diretas de CO<sub>2</sub> e fugas de CH<sub>4</sub> - demonstra que, embora o gás natural seja frequentemente classificado como “combustível de transição”, a sua utilização nos processos industriais intensivos mantém-se altamente problemática no contexto da descarbonização.

Relativamente, à toxicidade humana cancerígena, os resultados revelam a emissão de compostos extremamente perigosos. Entre estes, destacam-se as dioxinas policloradas, em particular a 2,3,7,8-TCDD, que se caracteriza por elevada persistência ambiental, elevada lipofilicidade e forte capacidade de bioacumulação. Os efeitos adversos vão muito além da carcinogénese, incluindo perturbações endócrinas, imunossupressão e efeitos teratogénicos. O formaldeído constitui outro poluente relevante, amplamente reconhecido pela sua relação causal com neoplasias do trato respiratório superior e leucemias, para além de ser um agente irritante de elevada relevância nos ambientes ocupacionais. Associados aos processos de combustão, os hidrocarbonetos aromáticos policíclicos, como o benzo(a)pireno e o dibenz(a,h)antraceno, apresentam forte ligação com cancro do pulmão, da pele e da bexiga, sendo ainda compostos altamente persistentes no ambiente. O crómio (VI), proveniente principalmente de processos ligados ao uso do aço, reforça o perfil de risco, devido à sua elevada solubilidade e facilidade de absorção pulmonar, sendo fortemente associado ao cancro do pulmão. Outros metais pesados, como o mercúrio e o níquel, embora presentes em menores quantidades, exercem toxicidade sistémica significativa: o mercúrio é neurotóxico e com elevado risco para o desenvolvimento fetal, enquanto o níquel está associado a neoplasias respiratórias e efeitos imunotóxicos. Esta diversidade de agentes químicos demonstra que o impacto não se limita à emissão de CO<sub>2</sub>, mas traduz-se numa verdadeira carga multiquímica de poluentes, com efeitos sinérgicos sobre a saúde humana.

Na categoria da formação fotoquímica de ozono, observa-se um predomínio das emissões de compostos orgânicos voláteis não metânicos (NMVOC) e óxidos de azoto (NO<sub>x</sub>). Estes compostos, na presença da radiação solar, desencadeiam reações fotoquímicas que resultam na formação de ozono troposférico. O ozono ao nível do solo é um poluente secundário particularmente agressivo, não só para a saúde humana - induzindo crises asmáticas, doenças respiratórias crónicas e efeitos cardiovasculares - como também para os ecossistemas, promovendo a oxidação de tecidos vegetais e a perda de produtividade agrícola. A presença de monóxido de carbono e de hidrocarbonetos leves (pentano, etano, butano), apesar da sua menor contribuição isolada, reforça o efeito cumulativo na carga fotoquímica, atuando como agentes redutores que intensificam a disponibilidade de radicais livres necessários às reações de formação de ozono.

No que respeita à ecotoxicidade na água doce, identificam-se substâncias inorgânicas como estrôncio, cloretos e sulfureto de hidrogénio, bem como metais e sais derivados de processos de combustão e produção de aço. O estrôncio apresenta potencial de bioacumulação e pode afetar processos de mineralização óssea em organismos aquáticos. O excesso de cloretos induz stress osmótico, comprometendo a homeostase de espécies aquáticas mais sensíveis, enquanto o sulfureto de hidrogénio interfere diretamente com o transporte de oxigénio celular, podendo provocar mortalidade nos organismos bentónicos. O alumínio e o ferro, resultantes dos processos de deposição atmosférica e lixiviação, apresentam toxicidade elevada nas condições de pH ácido, afetando principalmente peixes e macroinvertebrados. A presença de hidrocarbonetos aromáticos, embora em concentrações menores, não pode ser negligenciada devido à sua elevada persistência e potencial de bioacumulação.

A discussão integrada destes resultados permite concluir que a produção de cristobalite apresenta um perfil de impacto multidimensional: por um lado, fortemente marcado pelas emissões de gases com efeito de estufa e pela formação de ozono troposférico, e por outro, pela libertação de um conjunto heterogéneo de poluentes tóxicos com efeitos cancerígenos e ecotóxicos. Este panorama evidencia que a problemática não reside apenas na quantidade de energia consumida, mas sobretudo na qualidade das emissões geradas, muitas delas associadas a substâncias persistentes, bioacumulativas e de elevada toxicidade intrínseca.

Face a estes resultados, a mitigação não pode limitar-se à eficiência energética. É necessária uma abordagem integrada que combine:

- a substituição progressiva do gás natural por fontes renováveis de calor (energia solar térmica concentrada, hidrogénio verde ou eletrificação com recurso a energia renovável);
- a aplicação de tecnologias, como controlo de emissões atmosféricas, incluindo sistemas de redução seletiva de NO<sub>x</sub> (SCR, SNCR) e dispositivos de retenção de compostos orgânicos voláteis;
- a substituição de materiais auxiliares intensivos na poluição, como o aço convencional, por alternativas de menor pegada ambiental, incluindo ligas recicladas ou de menor intensidade carbónica.

A ACV da produção de cristobalite a nível global indica que a produção de 1 kg de cristobalite resulta em aproximadamente 0,2 kg CO<sub>2</sub> eq. (ciclo de vida da cristobalite). A distribuição das contribuições evidencia forte concentração do impacto de dois macroprocessos: o fornecimento de calor a partir de gás natural no forno industrial e o aço. Em conjunto, estes subprocessos superam 99,4% do total. A decomposição por fluxos atmosféricos demonstra o predomínio do dióxido de carbono ( $\approx 92,1\%$  do impacto climático), seguido pelo metano ( $\approx 7,7\%$ ), cuja presença está ligada sobretudo à etapa de gestão de resíduos e a possíveis emissões ou combustão incompleta do gás natural.

A tabela 4.5 presente no subcapítulo 4.4 evidencia a contribuição relativa de cada subprocesso para o impacto aquecimento global associado à produção de 1 kg de cristobalite, expressa em kg CO<sub>2</sub> eq.. Observa-se que a etapa de produção de calor a partir de gás natural

no forno industrial é, de forma destacada, o principal impacto, representando 0,174 kg CO<sub>2</sub> eq., equivalente a 98,6% do total. Esse resultado confirma a elevada intensidade carbónica associada à queima de combustíveis fósseis para produzir a energia térmica.

A tabela 4.12 apresenta uma comparação dos resultados da ACV relativos à produção de areia, obtidos em diferentes estudos. Verifica-se que os valores obtidos neste projeto para a extração de areia siliciosa (0,0000284 kg CO<sub>2</sub> eq./kg areia) e para a extração e lavagem (0,000133 kg CO<sub>2</sub> eq./kg areia) são substancialmente inferiores aos registados por outros autores, nomeadamente Grbeš (2016), De Souza (2012) e Ecoinvent. Nestes últimos, os valores oscilam entre 0,0296 e 0,0752 kg CO<sub>2</sub> eq./kg areia, dependendo da alternativa tecnológica considerada, ou em torno de 0,0042–0,0052 kg CO<sub>2</sub> eq./kg areia para os inventários do Ecoinvent.

Esta discrepância pode ser justificada por vários fatores metodológicos e contextuais. Em primeiro lugar, a definição de fronteiras do sistema (cradle-to-gate) e o nível de detalhe na modelação têm influência significativa. O estudo da cristobalite utilizou dados primários, obtidos diretamente nas operações industriais, refletindo condições reais de produção em Portugal, enquanto grande parte dos estudos comparados baseia-se em inventários genéricos ou em cenários teóricos com maior incorporação de consumos energéticos.

Tabela 4.12 - Impacte climático de vários tipos de produção/alternativas de areia.

Autor	Produto	kg CO <sub>2</sub> eq. / kg areia
Presente trabalho	Areia siliciosa (extração)	0,0000284
	Areia siliciosa (extração e lavagem)	0,000133
	Cristobalite (extração, lavagem e conversão)	0,174
Souza (2012) Ciclo de vida da areia	Areia - PAG procedimento normalização*	0,00091
	Areia - PAG procedimento ponderação*	0,00118
Grbeš (2016) Avaliação do impacto do ciclo de vida para oito alternativas <i>cradle-to-gate</i> na produção de areia de sílica	Alternativa 1 Electrostatic/dry	0,0527
	Alternativa 2 Basic/wet	0,0330
	Alternativa 3 Basic/dry	0,0430
	Alternativa 4 Flotation/wet	0,0431
	Alternativa 5 Flotation/dry	0,0752
	Alternativa 6 Gravity/wet	0,0419
	Alternativa 7 Gravity/dry	0,0525
	Alternativa 8 Simulation	0,0296
Ecoinvent	Sand {RoW}  gravel and sand quarry operation   Cut-off, U	0,00423 Energias mais representativas: 0,00112 - Diesel 0,000212 – Gás natural 0,000183 – Outros combustíveis fósseis

Autor	Produto	kg CO2 eq. / kg areia
Ecoinvent	Sand {RoW}  sand quarry operation, extraction from river bed   Cut-off, U	0,00522 Energias mais representativas: 0,0037 Diesel

\*Valores de normalização e ponderação específicos para determinados locais (Grbeš, 2016).

Adicionalmente, os inventários do Ecoinvent e os cenários de Grbeš (2016) apresentam maior peso relativo das energias fósseis (diesel, gás natural e outros combustíveis), considerados como representativos nos seus sistemas, o que contribui para o aumento das emissões atmosféricas associadas às categorias de impacto mais relevantes, como Alterações Climáticas, Acidificação, Formação fotoquímica de ozono e Utilização de recursos, uma vez que os processos baseados nos combustíveis fósseis foram identificados como os principais responsáveis pelos danos nos recursos, na saúde humana e nos ecossistemas. No caso português, a elevada penetração de fontes renováveis no mix energético nacional reduz substancialmente a intensidade carbónica associada ao consumo elétrico nos processos de extração e lavagem, o que se traduz em valores mais baixos de impacto climático.

Assim, a diferença observada entre os resultados da presente investigação e os de outros estudos internacionais reforça a pertinência da análise desenvolvida, destacando a importância da utilização de dados regionais e atualizados na avaliação de impactos ambientais. Esta abordagem não só confere maior representatividade dos resultados, como também permite identificar oportunidades de melhoria alinhadas com as políticas energéticas e ambientais nacionais.

## 5. Conclusões

A compreensão aprofundada dos impactos ambientais associados aos processos industriais é essencial para a definição de estratégias de sustentabilidade e para o cumprimento das exigências normativas e do mercado a nível de desempenho ambiental. Neste contexto, a ACV constitui uma ferramenta robusta para a identificação dos pontos críticos e oportunidades de melhoria ao longo das cadeias de valor. O presente estudo aplicou esta metodologia para a produção industrial de cristobalite, permitindo obter uma caracterização detalhada dos impactos ambientais e contribuir para a crescente base científica e otimização dos processos.

A produção industrial de cristobalite, apesar da sua relevância para diversas aplicações técnicas, apresenta um perfil ambiental marcado por impactos significativos nas categorias específicas. A ACV desenvolvida neste estudo, com âmbito *cradle-to-gate* e unidade funcional de 1 kg de cristobalite seca pronta para expedição, permitiu identificar os principais vetores de pressão ambiental do sistema analisado. A metodologia seguiu os princípios das normas ISO 14040:2006 e 14044:2006, recorrendo ao método Environmental Footprint 3.1 e à normalização por PEq, assegurando fiabilidade, comparabilidade e suporte à priorização de categorias de impacto. A análise concentrou-se nas categorias com maior representatividade relativa: Utilização de recursos fósseis, Alterações Climáticas (total), Toxicidade humana (cancerígenos), Formação fotoquímica de ozono (saúde humana) e Ecotoxicidade (água doce). Em todas as categorias, o fornecimento de calor por combustão de gás natural surgiu como o principal contributo para os impactos observados, evidenciando o papel central desta etapa de conversão no desempenho ambiental global do processo. O consumo energético e determinados fluxos materiais complementam os principais pontos críticos identificados, apontando caminhos claros para estratégias de mitigação focadas na eficiência energética e na descarbonização térmica.

Na categoria de Utilização de recursos fósseis, a produção de calor do forno industrial representa cerca de 99,0% do consumo, confirmando a natureza intensiva da energia térmica da conversão da areia siliciosa especial em cristobalite, com participação residual de outras fontes de recursos (petróleo, carvão, urânio em baixas percentagens). Para as Alterações Climáticas, o calor do processo corresponde a 98,6% dos impactos, a infraestrutura (construção em aço) a cerca de 0,6%, sendo o dióxido de carbono responsável por 92,1% e o metano por 7,7% das emissões caracterizadas nesta categoria.

Nas restantes categorias de impacto priorizadas, observa-se padrão convergente de dominância do calor de processo (gás natural) e contributos secundários de materiais (ex. aço), reiterando a transversalidade do vetor energético como principal impulsionador das pressões ambientais ao longo do ciclo *cradle-to-gate* da cristobalite. A presença significativa dos óxidos de azoto (NO<sub>x</sub>) associada à combustão reforça a necessidade de intervenções tecnológicas orientadas para a redução das emissões atmosféricas precursoras de ozono e de potenciais efeitos na saúde humana e ecossistemas, sublinhando a pertinência de estratégias

de mitigação direcionadas. A interpretação consolidada confirma que a otimização energética é o eixo estruturante de uma melhoria ambiental, com ganhos adicionais possíveis através da gestão aprimorada de resíduos e do aperfeiçoamento de materiais de suporte e infraestrutura.

As recomendações estratégicas emergentes priorizam a descarbonização do calor do processo (eletrificação parcial ou total; adoção de combustíveis alternativos de menor intensidade carbónica como biogás purificado ou hidrogénio verde; integração de medidas de eficiência: isolamento térmico, recuperação do calor residual, controlo de combustão) e a gestão de resíduos (redução na fonte, segregação para reciclagem, valorização energética como a captura e queima controlada de biogás), complementadas por aquisição de eletricidade de origem renovável e seleção de materiais estruturais de menor pegada (ex.: aço reciclado). Medidas adicionais específicas para mitigação de NO<sub>x</sub> – tais como tecnologias de combustão de baixa emissão e sistemas de redução catalítica – foram igualmente identificadas como parte de um portfólio integrado de soluções ambientais. Estas orientações alinham-se com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável relevantes (ODS 7, 9, 12 e 13), reforçando o compromisso com energia limpa, inovação industrial sustentável, produção responsável e ação climática no contexto da cadeia de valor da cristobalite.

O enquadramento metodológico rigoroso, a definição transparente das fronteiras e a normalização dos resultados conferem robustez interpretativa e utilidade prática do estudo, servindo como contributo científico e aplicado ao disponibilizar o inventário e análise sistemática dos principais fluxos e subprocessos críticos (energia térmica, energia elétrica, resíduos, materiais de suporte), oferecendo base comparativa sólida para futuras melhorias tecnológicas e decisões estratégicas no setor mineral e cerâmico nacional, e suportando o desenvolvimento de estratégias de economia circular e neutralidade carbónica para materiais siliciosos avançados. A importância de uma abordagem LCA para comparar opções e fundamentar escolhas de substituição ou de inovação material é sublinhada como instrumento essencial na transição para modelos produtivos de menor impacto ambiental.

## 5.1. Desenvolvimentos futuros

O presente projeto abre espaço para vários desenvolvimentos futuros, tanto na vertente metodológica como na aplicação prática das melhorias ambientais no processo produtivo de cristobalite. A continuação deste trabalho deverá contemplar, em primeiro lugar, a expansão do âmbito da ACV para um modelo *cradle-to-grave*, de modo a incluir as fases de utilização e fim de vida dos produtos que incorporam cristobalite, permitindo assim uma avaliação mais completa do ciclo de vida e uma melhor quantificação das oportunidades de redução dos impactos em toda a cadeia de valor.

Outro vetor prioritário será a modelação de cenários energéticos alternativos, explorando a substituição parcial ou total do gás natural por fontes de energia de menor intensidade carbónica, como a eletrificação com recurso a um mix elétrico predominantemente renovável, biogás ou hidrogénio verde. A análise de sensibilidade destes cenários permitirá avaliar reduções potenciais das emissões de gases com efeito de estufa, bem como

quantificar os efeitos sobre outras categorias de impacto, nomeadamente toxicidade humana e formação fotoquímica de ozono.

A mitigação deve focar-se na melhoria da eficiência energética e otimização operacional do forno, assim com a substituição ou hibridização do gás natural por fontes renováveis/elettrificação. A implementação articulada de medidas permitirá reduzir simultaneamente a formação potencial de ozono e outros impactes correlacionados, contribuindo para a melhoria da qualidade do ar e para o desempenho ambiental global do ciclo de vida da cristobalite.

Será igualmente pertinente a avaliação da eficiência energética e tecnológica do processo, com estudos detalhados sobre a otimização de fornos, sistemas de recuperação de calor residual, melhoria do isolamento térmico e implementação de um controlo avançado da combustão, de forma a reduzir consumos e emissões associadas.

No domínio dos materiais e resíduos, recomenda-se a investigação de soluções de economia circular, com destaque para o reaproveitamento de resíduos gerados no processo (por exemplo, como matéria-prima secundária) e a redução da fração biodegradável em aterro, como por exemplo o cartão e filme de polietileno, minimizando as emissões de metano. Cenários que incluam tecnologias de retenção e valorização do biogás nos aterros poderão ser modelados para quantificar benefícios adicionais.

Com estas linhas de investigação, espera-se não só reforçar a robustez técnica do estudo, mas também fornecer ferramentas práticas para a indústria reduzir a sua pegada ambiental e alinhar-se com metas nacionais e europeias de descarbonização e economia circular.

## Referências Bibliográficas

- Ashutosh, M. (2015). Impact of silica mining on environment. *Journal of Geography and Regional Planning*, 8(6). <https://doi.org/10.5897/jgrp2015.0495>
- Associação Brasileira de Cerâmica – ABCERAM. (2025). *Matérias Primas Naturais*. <https://Abceram.Org.Br/Materias-Primas-Naturais/>. <https://abceram.org.br/materias-primas-naturais/>
- Bidragon Machinery Co., Ltd. (2025, June 6). *Complete Guide to Industrial Steam Boilers*. <https://www.cnboilers.net/blog/complete-guide-to-industrial-steam-boilers.html>
- Brasil, J. D. B. (2018). *Prospecção, caracterização e avaliação de recursos de areias siliciosas para a indústria vidreira*. Universidade Nova de Lisboa.
- cbladminit. (2025, October 16). *Biomass Boilers – The Future of Sustainable Industrial Heating*. <https://cheemaboilers.com/biomass-boilers-the-future-of-sustainable-industrial-heating/>
- Centro de Informação Geoespacial do Exército. (2008). *Carta Militar de Portugal Série M586 - Folha 5 - 1/250 000 - Lisboa*.
- Chaouki, J., Farag, S., Attia, M., & Doucet, J. (2020). The development of industrial (thermal) processes in the context of sustainability: The case for microwave heating. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 98(4), 832–847. <https://doi.org/10.1002/cjce.23710>
- Dahanni, H., Ventura, A., Le Guen, L., Dauvergne, M., Orcesi, A., & Cremona, C. (2024). Life cycle assessment of cement: Are existing data and models relevant to assess the cement industry's climate change mitigation strategies? A literature review. *Construction and Building Materials*, 411, 1–15. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.134415>
- Data Bridge Market. (2024, December). *Global Cristobalite Market*. <https://www.databridgemarketresearch.com/pt/reports/global-cristobalite-market>
- Souza, A. De. (2012). *Avaliação do Ciclo de Vida da areia em Mineradora de pequeno porte, na região de São José do Rio Preto, SP*. [Universidade Federal de São Carlos]. <https://repositorio.ufscar.br/handle/20.500.14289/4333>
- Deutscher Medien Verlag GmbH. (2025). *Cristobalite Manufacturers, Traders, Suppliers*. <https://www.industrystock.com/en/companies/Mining-Industry-Technology/Mineral/Cristobalite>

- Errington, E., Guo, M., & Heng, J. Y. Y. (2022). Synthetic amorphous silica: environmental impacts of current industry and the benefit of biomass-derived silica. *Green Chemistry*, 25(11), 4244–4259. <https://doi.org/10.1039/d2gc01433e>
- Grbeš, A. (2016). A life cycle assessment of silica sand: Comparing the beneficiation processes. *Sustainability (Switzerland)*, 8(1). <https://doi.org/10.3390/su8010011>
- Green Savers. (2024, October 18). *Rumo à neutralidade carbónica: Cimpor reduz combustíveis fósseis e aumenta eficiência energética*. <https://greensavers.sapo.pt/rumo-a-neutralidade-carbonica-cimpor-reduz-combustiveis-fosseis-e-aumenta-eficiencia-ergetica/>
- Grenzebach Group. (2025). *Cristobalite Systems from Grenzebach: Efficient. Durable. Tailor-Made*. <https://www.grenzebach.com/en/markets/building-materials/cristobalite/>
- Grupo Parapedra. (2025). *Catálogo Grupo Parapedra*.
- Grupo Parapedra. (2025). *CRISTOBALITE*. <https://grupoparapedra.pt/cristobalite/>
- Hemley, R. J., Prewitt, C. T., & Gibbs, G. V. (2019). Silica: Physical behavior, geochemistry, and materials applications. In *Silica: Physical Behavior, Geochemistry, and Materials Applications* (Vol. 29). <https://doi.org/10.1515/9781501509698>
- IARC. (2025). *International Agency for Research on Cancer (IARC)*. <https://www.iarc.who.int/>
- Key-Schwartz, R. J., Baron, P. A., Bartley, D. L., Rice, F. L., & Schlecht, P. C. (2003). *Determination of Airborne Crystalline Silica*.
- Long, H., Zhu, D., Pan, J., Li, S., Guo, Z., & Xu, X. (2024). Innovative process for the extraction of 99.99% high-purity quartz from high-silicon iron ore tailings. *Journal of Materials Research and Technology*, 31, 2094–2102. <https://doi.org/10.1016/J.JMRT.2024.06.212>
- Bairras, A. M. V. (2016). *Análise de Ciclo de Vida de Betão com Agregados Reciclados para Aplicação Estrutural*. Universidade da Beira Interior.
- Mlinde, A. (2024). *Life Cycle Assessment of Geopolymeric Materials*. Escola Superior de Tecnologia e Gestão.
- OCS Optical Control Systems GmbH. (2025). *Powder Tester (PT2C)*. <https://www.ocsgmbh.com/en/products/powder-tester-pt2c/>
- Pato, P. A. M. de O. (2015). *Análise do Ciclo de Vida do Cimento Caso de Estudo: Fábrica da Secil-Outão*. Universidade Nova de Lisboa.
- PitchBook. (2025). *U.S. Silica Holdings*. <https://Pitchbook.Com/Profiles/Company/10604-89#data>. <https://pitchbook.com/profiles/company/10604-89#data>

- Quarzwerke GmbH. (2025). *Cristobalite—synthesized from quartz*. <https://www.quarzwerke.com/en/products/high-performance-fillers/cristobalite>
- SECIL. (2025). *O Processo de Fabrico do Cimento*. <https://www.secil.pt/pt/produtos/cimento/processo-de-fabrico-cimento>
- Sérgio Lima Souza, P., & Dal Molin, D. C. (2002). Estudo da viabilidade do uso de argilas calcinadas, como metacaulim de alta reatividade. *IX Encontro Nacional de Tecnologia Do Ambiente Construído*.
- Singh, N. B., & Middendorf, B. (2007). Calcium sulphate hemihydrate hydration leading to gypsum crystallization. *Progress in Crystal Growth and Characterization of Materials*, 53(1), 57–77. <https://doi.org/10.1016/j.pcrysgrow.2007.01.002>
- Soares, A., Cristina Simões, A., Dias, A., Gonçalves, A., Gomes, B., Barbosa, C., Lico, I., Dias, J., André, J., Vicente Ferreira, J., Costa, L., Teixeira, M., Inês Santos, M., Almeida, M., Santos, M., Frazão, R., Ângelo, S., & Lamego Vitor Martins, S. (2023). *SC5-Avaliação do Ciclo de Vida*. [https://apambiente.pt/sites/default/files/\\_Avaliacao\\_Gestao\\_Ambiental/Qualif\\_Certif\\_Normal/Normaliza%C3%A7%C3%A3o/Workshop%20CT150\\_2023/SC%205%20Avalia%C3%A7%C3%A3o%20do%20ciclo%20de%20vida%20.pdf](https://apambiente.pt/sites/default/files/_Avaliacao_Gestao_Ambiental/Qualif_Certif_Normal/Normaliza%C3%A7%C3%A3o/Workshop%20CT150_2023/SC%205%20Avalia%C3%A7%C3%A3o%20do%20ciclo%20de%20vida%20.pdf)
- Tasiopoulou, T., Katsourinis, D., Giannopoulos, D., & Founti, M. (2023). Production-Process Simulation and Life-Cycle Assessment of Metakaolin as Supplementary Cementitious Material. *Eng*, 4(1), 761–779. <https://doi.org/10.3390/eng4010046>
- Tribout, C., Escadeillas, G., Hodroj, M., Nicolas, J. L., & Bergès, T. (2024). Methodological approach based on life cycle assessment for upcycling leftover concrete into dry industrial mortars. *Journal of Building Engineering*, 86, 1–1. <https://doi.org/10.1016/J.JOBE.2024.108868>
- Yang, S., Han, S., Chen, J., Wei, K., & Ma, W. (2024). A sustainable mineral process for silicon and quartz recovery from quartz crucible waste ash via electrical separation. *Minerals Engineering*, 216, 1–1. <https://doi.org/10.1016/J.MINENG.2024.108887>
- Zbyszewski, G., & Moitinho de Almeida, F. (1960). Carta Geológica de Portugal na escala 1/50000, folha 26-D, Caldas da Rainha. In *Serv Geol. Portugal, Lisboa*.

# Anexos

## Anexo A - Resultados de Normalização

Resultados de normalização para comparação entre as várias categorias de impacto ambiental.

Tabela A.1 - Resultados da produção de cristobalite (normalizados).

Categoria de danos	Total	Cristobalite, at mill	Quartz sand, washed, U	Building, hall, steel construction {CH}  building construction, hall, steel construction   Cut-off, U	Conveyor belt {RER}  conveyor belt production   Cut-off, U	Paper sack {RER}  market for paper sack   Cut-off, U	Sodium hydroxide, without water, in 50% solution state {RER}  market for sodium hydroxide, without water, in 50% solution state   Cut-off, U	Lubricating oil {RER}  market for lubricating oil   Cut-off, U	Packaging film, low density polyethylene {RER}  packaging film production, low density polyethylene   Cut-off, U
Acidification	2,94E-06	0	1,07E-08	1,69E-07	2,28E-08	5,06E-09	2,19E-08	1,35E-09	3,94E-09
Climate change	2,30E-05	0	1,86E-08	1,38E-07	4,21E-08	6,49E-09	3,46E-08	2,28E-09	8,34E-09
Ecotoxicity, freshwater	1,79E-06	0	1,58E-08	1,43E-07	3,64E-08	5,32E-09	5,17E-08	1,03E-09	6,13E-09
Particulate matter	1,71E-06	0	2,15E-08	2,34E-07	4,67E-08	4,32E-09	1,60E-08	1,17E-09	3,65E-09
Eutrophication, marine	2,75E-06	0	6,70E-09	6,89E-08	1,47E-08	5,50E-09	1,34E-08	6,73E-10	2,44E-09
Eutrophication, freshwater	3,07E-06	0	4,46E-08	1,59E-07	1,02E-07	2,94E-08	1,31E-07	2,29E-09	1,03E-08
Eutrophication, terrestrial	3,31E-06	0	8,14E-09	1,95E-07	1,66E-08	5,24E-09	1,31E-08	7,76E-10	2,74E-09
Human toxicity, cancer	1,56E-06	0	9,84E-09	3,94E-08	2,23E-08	1,35E-09	1,20E-07	2,42E-10	7,33E-10
Human toxicity, non-cancer	1,87E-06	0	1,79E-08	8,17E-08	3,98E-08	3,70E-09	2,68E-08	1,42E-09	2,95E-09
Ionising radiation	3,52E-07	0	1,69E-09	1,01E-08	3,06E-09	1,95E-09	1,72E-08	3,57E-10	1,32E-09
Land use	1,26E-07	0	5,57E-08	4,76E-09	1,26E-09	1,10E-08	1,38E-09	7,48E-11	3,11E-10
Ozone depletion	1,49E-07	0	1,93E-11	1,79E-10	3,95E-11	4,42E-11	2,79E-10	2,04E-11	3,38E-11
Photochemical ozone formation	7,29E-06	0	1,18E-08	1,07E-07	2,59E-08	7,19E-09	1,76E-08	8,36E-09	8,01E-09
Resource use, fossils	4,33E-05	0	2,39E-08	1,54E-07	5,27E-08	1,39E-08	6,60E-08	1,07E-08	2,54E-08
Resource use, minerals and metals	1,41E-06	0	1,64E-08	3,41E-07	3,43E-08	3,44E-09	5,90E-08	2,32E-09	4,25E-09
Water use	5,75E-07	4,32E-08	2,31E-07	1,51E-08	1,21E-08	4,54E-09	7,68E-09	3,34E-10	3,08E-09

Tabela A.2 - Resultados da produção de cristobalite (normalizados) (cont).

Categoria de danos	Diesel, burned in building machine {GLO}  diesel, burned in building machine   Cut-off, U	Steel, low-alloyed, hot rolled {RER}  steel production, low-alloyed, hot rolled   Cut-off, U	Electricity, medium voltage {PT}  market for electricity, medium voltage   Cut-off, U	Electricity, low voltage {PT}  electricity production, photovoltaic, 570kWp open ground installation, multi-Si   Cut-off, U	Heat, district or industrial, natural gas without Switzerland}  heat production, natural gas, at industrial furnace >100kW   Cut-off, U	Waste rubber, unspecified {CH}  market for waste rubber, unspecified   Cut-off, U	Residues, MSWI-WWT-SLF, municipal solid waste {GLO}  treatment of residues, MSWI-WWT-SLF, municipal solid waste, residual material landfill   Cut-off, U	Waste mineral oil {Europe without Switzerland}  treatment of waste mineral oil, hazardous waste incineration, with energy recovery   Cut-off, U
Acidification	8,08E-09	3,89E-08	3,58E-10	8,23E-12	2,65E-06	2,40E-11	1,38E-09	4,81E-11
Climate change	6,65E-09	6,73E-08	6,30E-10	9,41E-12	2,27E-05	1,28E-09	3,08E-09	4,11E-09
Ecotoxicity, freshwater	6,26E-10	6,05E-08	8,53E-11	9,58E-12	1,47E-06	3,10E-10	4,80E-09	4,16E-11
Particulate matter	2,15E-08	8,23E-08	2,17E-10	8,88E-12	1,28E-06	1,23E-11	1,39E-09	2,03E-10
Eutrophication, marine	1,07E-08	2,51E-08	1,69E-10	4,04E-12	2,60E-06	2,77E-11	1,82E-09	4,99E-11
Eutrophication, freshwater	1,01E-09	1,81E-07	3,53E-10	2,25E-11	2,28E-06	1,68E-11	1,21E-07	1,25E-09
Eutrophication, terrestrial	1,29E-08	2,85E-08	2,09E-10	4,79E-12	3,03E-06	3,31E-11	1,46E-09	6,99E-11
Human toxicity, cancer	2,96E-10	4,02E-08	5,57E-11	2,38E-12	1,28E-06	6,62E-12	4,68E-08	1,58E-10
Human toxicity, non-cancer	6,24E-10	7,14E-08	1,90E-10	1,73E-11	1,46E-06	2,11E-11	1,62E-07	2,76E-10
Ionising radiation	6,60E-11	5,34E-09	2,44E-10	1,28E-12	3,10E-07	1,42E-12	5,64E-11	2,41E-12
Land use	5,30E-11	2,12E-09	3,02E-11	1,29E-11	4,94E-08	5,71E-13	1,84E-10	1,25E-12
Ozone depletion	1,43E-11	5,61E-11	2,55E-12	1,29E-13	1,48E-07	4,62E-14	2,19E-12	8,68E-14
Photochemical ozone formation	1,68E-08	4,35E-08	3,64E-10	7,34E-12	7,05E-06	3,69E-11	1,84E-09	6,75E-11
Resource use, fossils	1,01E-08	8,58E-08	1,26E-09	1,36E-11	4,29E-05	1,91E-11	2,22E-09	4,94E-11
Resource use, minerals and metals	2,82E-10	5,62E-08	2,20E-10	4,64E-11	8,93E-07	6,14E-12	9,41E-10	2,02E-11
Water use	1,22E-10	1,54E-08	3,58E-10	5,84E-12	2,42E-07	3,32E-12	2,18E-10	3,35E-11

## Anexo B - Tabelas com a apresentação dos resultados de caracterização

Tabela B.1 - Resultados da produção de cristobalite.

Categoria de impacto	Unidade	Total	Cristobalite, at mill	Quartz sand, washed, U	Building, hall, steel construction {CH}   building construction, hall, steel construction   Cut-off, U	Conveyor belt {RER}   conveyor belt production   Cut-off, U	Paper sack {RER}   market for paper sack   Cut-off, U	Sodium hydroxide, without water, in 50% solution state {RER}   market for sodium hydroxide, without water, in 50% solution state   Cut-off, U	Lubricating oil {RER}   market for lubricating oil   Cut-off, U
Acidification	mol H <sup>+</sup> eq	0,000163	0	5,95E-07	9,39E-06	1,27E-06	2,81E-07	1,22E-06	7,53E-08
Climate change	kg CO <sub>2</sub> eq	0,173675	0	0,00014	0,001039	0,000318	4,90E-05	0,000261	1,72E-05
Climate change - Biogenic	kg CO <sub>2</sub> eq	1,80E-05	0	1,28E-07	2,40E-06	2,37E-07	2,90E-07	6,43E-07	1,52E-08
Climate change - Fossil	kg CO <sub>2</sub> eq	0,173642	0	0,00014	0,001035	0,000317	4,81E-05	0,00026	1,72E-05
Climate change - Land use and LU change	kg CO <sub>2</sub> eq	1,58E-05	0	1,96E-07	8,25E-07	6,44E-07	5,89E-07	4,33E-07	1,19E-08
Ecotoxicity, freshwater	CTUe	0,10156	0	0,000893	0,008086	0,002064	0,000302	0,002931	5,82E-05
Ecotoxicity, freshwater - inorganics	CTUe	0,09535	0	0,000873	0,007993	0,002011	0,000234	0,002914	5,30E-05
Ecotoxicity, freshwater - organics	CTUe	0,00621	0	2,00E-05	9,34E-05	5,32E-05	6,74E-05	1,69E-05	5,17E-06
Particulate matter	disease inc.	1,02E-09	0	1,28E-11	1,39E-10	2,78E-11	2,57E-12	9,52E-12	6,97E-13
Eutrophication, marine	kg N eq	5,38E-05	0	1,31E-07	1,35E-06	2,88E-07	1,07E-07	2,63E-07	1,32E-08
Eutrophication, freshwater	kg P eq	4,93E-06	0	7,17E-08	2,55E-07	1,64E-07	4,73E-08	2,11E-07	3,68E-09
Eutrophication, terrestrial	mol N eq	0,000586	0	1,44E-06	3,44E-05	2,93E-06	9,27E-07	2,32E-06	1,37E-07
Human toxicity, cancer	CTUh	2,69E-11	0	1,70E-13	6,79E-13	3,85E-13	2,32E-14	2,07E-12	4,17E-15
Human toxicity, cancer - inorganics	CTUh	3,90E-12	0	6,83E-14	2,74E-13	1,56E-13	5,80E-15	4,09E-14	2,16E-15
Human toxicity, cancer - organics	CTUh	2,30E-11	0	1,02E-13	4,05E-13	2,29E-13	1,74E-14	2,03E-12	2,02E-15
Human toxicity, non-cancer	CTUh	2,40E-10	0	2,31E-12	1,05E-11	5,13E-12	4,77E-13	3,45E-12	1,82E-13
Human toxicity, non-cancer - inorganics	CTUh	2,12E-10	0	2,24E-12	1,01E-11	4,99E-12	4,37E-13	3,26E-12	1,43E-13
Human toxicity, non-cancer - organics	CTUh	2,83E-11	0	6,58E-14	4,42E-13	1,43E-13	4,01E-14	1,88E-13	3,93E-14
Ionising radiation	kBq U-235 eq	0,001484	0	7,15E-06	4,28E-05	1,29E-05	8,23E-06	7,25E-05	1,51E-06
Land use	Pt	0,103498	0	0,045645	0,003903	0,001034	0,009008	0,00113	6,13E-05
Ozone depletion	kg CFC11 eq	7,79E-09	0	1,01E-12	9,36E-12	2,07E-12	2,31E-12	1,46E-11	1,07E-12
Photochemical ozone formation	kg NMVOC eq	0,000298	0	4,83E-07	4,36E-06	1,06E-06	2,94E-07	7,21E-07	3,42E-07
Resource use, fossils	MJ	2,815453	0	0,001557	0,009999	0,003423	0,000904	0,004288	0,000692
Resource use, minerals and metals	kg Sb eq	8,98E-08	0	1,04E-09	2,17E-08	2,18E-09	2,19E-10	3,76E-09	1,48E-10
Water use	m <sup>3</sup> depriv.	0,006594	0,000496	0,00265	0,000173	0,000139	5,20E-05	8,80E-05	3,83E-06

Tabela B.2 - Resultados da produção de cristobalite (cont.).

Categoria de impacto	Unidade	Packaging film, low density polyethylene {RER}  packaging film production, low density polyethylene   Cut-off, U	Diesel, burned in building machine {GLO}  diesel, burned in building machine   Cut-off, U	Steel, low-alloyed, hot rolled {RER}  steel production, low-alloyed, hot rolled   Cut-off, U	Electricity, medium voltage {PT}  market for electricity, medium voltage   Cut-off, U	Electricity, low voltage {PT}  electricity production, photovoltaic, 570kWp open ground installation, multi-Si   Cut-off, U	Heat, district or industrial, natural gas {Europe without Switzerland}  heat production, natural gas, at industrial furnace >100kW   Cut-off, U	Waste rubber, unspecified {CH}  market for waste rubber, unspecified   Cut-off, U	Residues, MSWI-WWT-SLF, municipal solid waste {GLO}  treatment of residues, MSWI-WWT-SLF, municipal solid waste, residual material landfill   Cut-off, U	Waste mineral oil {Europe without Switzerland}  treatment of waste mineral oil, hazardous waste incineration, with energy recovery   Cut-off, U
Acidification	mol H <sup>+</sup> eq	2,19E-07	4,49E-07	2,16E-06	1,99E-08	4,57E-10	0,000147	1,34E-09	7,66E-08	2,67E-09
Climate change	kg CO <sub>2</sub> eq	6,30E-05	5,03E-05	0,000508	4,76E-06	7,11E-08	0,171161	9,67E-06	2,33E-05	3,10E-05
Climate change - Biogenic	kg CO <sub>2</sub> eq	5,60E-08	5,06E-09	3,90E-07	1,80E-08	2,11E-10	1,38E-05	1,23E-10	2,11E-08	3,58E-10
Climate change - Fossil	kg CO <sub>2</sub> eq	6,29E-05	5,02E-05	0,000507	4,62E-06	7,07E-08	0,171135	9,67E-06	2,32E-05	3,10E-05
Climate change - Land use and LU change	kg CO <sub>2</sub> eq	6,18E-08	5,14E-09	3,39E-07	1,19E-07	1,39E-10	1,25E-05	3,92E-11	9,64E-09	1,20E-10
Ecotoxicity, freshwater	CTUe	0,000347	3,55E-05	0,003433	4,84E-06	5,43E-07	0,083112	1,76E-05	0,000272	2,36E-06
Ecotoxicity, freshwater - inorganics	CTUe	0,000338	3,25E-05	0,003355	4,66E-06	5,34E-07	0,07725	1,75E-05	0,000271	2,35E-06
Ecotoxicity, freshwater - organics	CTUe	9,04E-06	2,96E-06	7,79E-05	1,76E-07	9,46E-09	0,005862	8,62E-09	9,01E-07	1,67E-08
Particulate matter	disease inc.	2,17E-12	1,28E-11	4,90E-11	1,29E-13	5,29E-15	7,60E-10	7,29E-15	8,29E-13	1,21E-13
Eutrophication, marine	kg N eq	4,77E-08	2,09E-07	4,91E-07	3,31E-09	7,89E-11	5,09E-05	5,42E-10	3,56E-08	9,75E-10
Eutrophication, freshwater	kg P eq	1,65E-08	1,62E-09	2,91E-07	5,68E-10	3,61E-11	3,67E-06	2,70E-11	1,94E-07	2,02E-09
Eutrophication, terrestrial	mol N eq	4,84E-07	2,29E-06	5,04E-06	3,70E-08	8,46E-10	0,000535	5,85E-09	2,58E-07	1,23E-08
Human toxicity, cancer	CTUh	1,26E-14	5,11E-15	6,93E-13	9,61E-16	4,11E-17	2,20E-11	1,14E-16	8,07E-13	2,72E-15
Human toxicity, cancer - inorganics	CTUh	4,84E-15	1,58E-15	2,79E-13	3,30E-16	1,84E-17	2,27E-12	1,44E-17	8,05E-13	1,33E-15
Human toxicity, cancer - organics	CTUh	7,80E-15	3,53E-15	4,14E-13	6,30E-16	2,27E-17	1,97E-11	9,98E-17	2,10E-15	1,39E-15
Human toxicity, non-cancer	CTUh	3,80E-13	8,03E-14	9,20E-12	2,44E-14	2,23E-15	1,88E-10	2,72E-15	2,09E-11	3,56E-14
Human toxicity, non-cancer - inorganics	CTUh	3,47E-13	6,69E-14	8,95E-12	2,28E-14	2,15E-15	1,61E-10	2,67E-15	2,09E-11	3,55E-14
Human toxicity, non-cancer - organics	CTUh	3,32E-14	1,34E-14	2,46E-13	1,65E-15	7,56E-17	2,71E-11	4,99E-17	4,95E-15	9,80E-17
Ionising radiation	kBq U-235 eq	5,57E-06	2,79E-07	2,25E-05	1,03E-06	5,40E-09	0,001309	5,98E-09	2,38E-07	1,02E-08
Land use	Pt	0,000255	4,34E-05	0,001738	2,47E-05	1,06E-05	0,040494	4,68E-07	0,000151	1,02E-06
Ozone depletion	kg CFC11 eq	1,77E-12	7,46E-13	2,93E-12	1,34E-13	6,77E-15	7,76E-09	2,42E-15	1,15E-13	4,54E-15
Photochemical ozone formation	kg NMVOC eq	3,27E-07	6,85E-07	1,78E-06	1,49E-08	3,00E-10	0,000288	1,51E-09	7,50E-08	2,76E-09
Resource use, fossils	MJ	0,00165	0,000654	0,005581	8,18E-05	8,85E-07	2,786474	1,24E-06	0,000144	3,21E-06
Resource use, minerals and metals	kg Sb eq	2,71E-10	1,79E-11	3,57E-09	1,40E-11	2,95E-12	5,68E-08	3,91E-13	5,99E-11	1,29E-12
Water use	m <sup>3</sup> depriv.	3,54E-05	1,40E-06	0,000177	4,11E-06	6,69E-08	0,002771	3,81E-08	2,50E-06	3,84E-07

## Anexo C - Gráfico com a apresentação dos resultados de caracterização

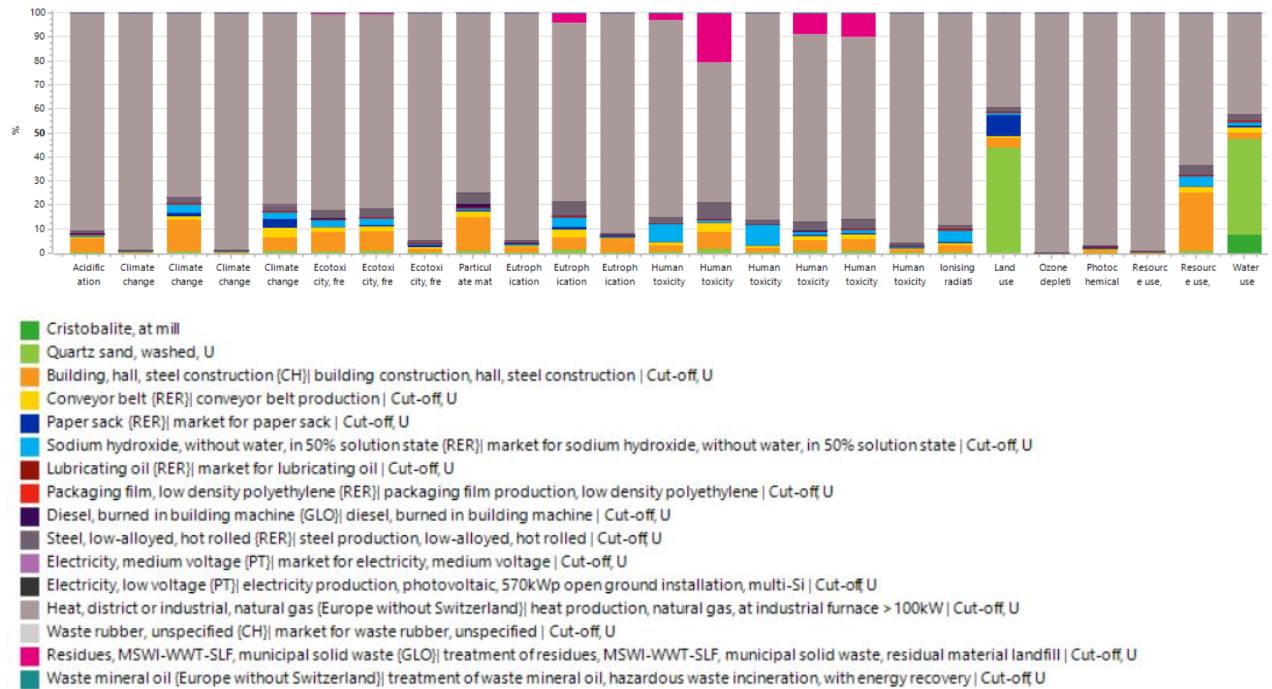


Figura C.1 - Resultados das categorias de impacto ambiental pela metodologia Environmental Footprint 3.1.