



**ROAD TO 2050**

ROTEIRO PARA A DESCARBONIZAÇÃO  
DO SETOR DA PEDRA NATURAL



# Roteiro para a Descarbonização do Setor da Pedra Natural



**ASSIMAGRA**  
RECURSOS MINERAIS DE PORTUGAL





# **Roteiro para a Descarbonização do Setor da Pedra Natural**

A redação do presente documento, **Roteiro para a Descarbonização do Setor da Pedra Natural**, é da responsabilidade da ASSIMAGRA – Associação Portuguesa da Indústria dos Recursos Minerais, no âmbito do projeto ROAD TO 2050, financiado pelo PRR, do qual a ASSIMAGRA é promotora e beneficiária.

#### **FICHA TÉCNICA**

##### **Propriedade:**

ASSIMAGRA – Associação Portuguesa da Indústria dos Recursos Minerais

Largo do Rossio, Edifício S. Pedro, Escritório n.º 5

2480-314 Porto de Mós

e-mail: [assimagra@assimagra.pt](mailto:assimagra@assimagra.pt)

[www.assimagra.pt](http://www.assimagra.pt)

##### **Autoria e coordenação editorial:**

Célia Marques, Nelson Cristo, Catarina Santos, António Baio Dias, Marisa Almeida, Inês Rondão, Isabel Antunes, Pedro Frade, Anabela Amado, Milene Lopes, Victor Francisco, Sandra Carvalho, Sofia Ferreira, Carlos Monteiro, António Silva.

##### **Design Gráfico e Paginação:**

Slideshow - Creative Agency

Edição: dezembro 2025

**Colaborações externas:**

O **Roteiro para a Descarbonização do Setor da Pedra Natural** contou com a participação de especialistas convidados de diferentes áreas, instituições e empresas, que contribuíram com o seu conhecimento e experiência na elaboração de conteúdos em diversas áreas de conhecimento.

- Gerd Merke (EUROROC – **Federação Europeia e Internacional das Indústrias de Pedra Natural**)
- Jorge Cristino (**Get2C**)
- Isabel Duarte de Almeida (Iscte – **Instituto Universitário de Lisboa**)
- Rui Queiroga (**Cleanwatts, S.A.**)
- Sara Freitas (**APREN – Associação Portuguesa de Energias Renováveis**)
- João Pinho, Gonçalo Lourinho, Carolina Gonçalves, Joana Bernardo, Francisco Gírio (**CoLAB BIOREF – Laboratório Colaborativo para as Biorrefinarias**)
- Luís Serrano, Ricardo Almeida, Diogo Silva (**Instituto Politécnico de Leiria**)
- Frederico Sousa Cardoso (**STONECITI | Rede Europeia de Polos de Inovação Digital - EDIH**)
- Samuel Neves, Anabela Jorge (**ARROW4D – Consultores de Engenharia e Geofísica, Lda.**)
- João Carlos Santos (**STET – Sociedade Técnica de Equipamentos e Tratores, S.A.**)
- Joana Frazão; Inês Frazão Eliseu Frazão (**FRAVIZEL – Equipamentos Metalomecânicos, S.A.**)
- Agostinho da Silva (**CEI by Zipor – Companhia de Equipamentos Industriais, Lda.**)
- Jorge Pedro, Paula Afonso, Patrícia Moita, Júlio Carneiro (**Universidade de Évora**)
- Francisco Lázaro, João Pedro Cardoso, Maria Margarida Vieira, Roberto Carlos Ribeiro, Cátia da Costa, Isabel Azevedo, Ricardo Barbosa (**INEGI – Instituto de Ciência e Inovação em Engenharia Mecânica e Engenharia Industrial**)
- Diogo Caupers; Maria da Luz Alvim (**Casa da Mesquita**)



# Índice

<b>Mensagem da Euroroc</b> .....	<b>10</b>
<b>Prefácio</b> .....	<b>12</b>
<b>Roteiro para a Descarbonização do setor da Pedra Natural</b> .....	<b>15</b>
<b>Preâmbulo</b> .....	<b>16</b>
<b>1. Caracterização do Setor da Pedra Natural</b> .....	<b>20</b>
1.1. A Indústria Extrativa em Portugal .....	20
1.2. Pedra Natural: da Extração à Transformação .....	24
1.3. Cadeia de Valor da Pedra Natural .....	30
1.4. Evolução do Setor em Termos de Produção, Governança e Sustentabilidade .....	32
1.4.1. Da extração tradicional à Inovação produtiva .....	32
1.4.1.1. Transformações estruturais nas últimas décadas .....	32
1.4.1.2. Transformação tecnológica e digitalização dos processos .....	34
1.4.1.3. Mudança no perfil de produto e novos mercados .....	34
1.4.1.4. Desafios atuais na produção .....	36
1.4.2. Da gestão familiar à governança estratégica .....	37
1.4.2.1. Estrutura empresarial e modelos de gestão predominantes .....	37
1.4.2.2. Governança setorial e associativismo .....	38
1.4.2.3. Tendências de maturação na governança .....	38
1.4.2.4. Relação com políticas públicas e planeamento estratégico .....	39
1.4.3. Sustentabilidade: de desafio a vantagem competitiva .....	39
1.4.3.1. De obrigação a estratégia: a viragem da sustentabilidade .....	39
1.4.3.2. Iniciativas em curso: caminhos de mudança .....	40
1.4.3.3. Sustentabilidade e certificação: tendências emergentes .....	41
1.4.3.4. Barreiras à mudança e a sustentabilidade como ativo competitivo .....	41
1.4.4. Perspetivas futuras e conclusão .....	42
1.4.4.1. Visão para 2040-2050: um setor mais resiliente, sustentável e inovador .....	42
1.4.4.2. Recomendação estratégica: valorizar o que nos distingue .....	46
1.4.4.3. Consideração final .....	46
<b>2. Alterações Climáticas e a Necessidade de Descarbonização</b> .....	<b>49</b>
2.1. Descarbonização no Setor da Pedra Natural: um Contributo para o Futuro da Competitividade Europeia .....	50
2.2. Clima, Carbono e Energia: Enquadramento Regulamentar Europeu e Nacional da Descarbonização .....	58
2.3. Principais Vetores de Descarbonização no Setor da Pedra Natural .....	66
<b>3. Evolução Prevista para o Setor</b> .....	<b>71</b>
3.1. Produção .....	72
3.2. Consumos Energéticos .....	73
3.3. Emissões GEE .....	74

<b>4. Principais Tecnologias, Técnicas e Medidas de Descarbonização Disponíveis a Curto, Médio e Longo Prazo, até 2050 .....</b>	<b>77</b>
4.1. Eficiência Energética .....	78
4.1.1. O papel dos sistemas de monitorização na eficiência energética .....	78
4.1.2. Medidas para melhoria da eficiência energética .....	82
4.2. Eletrificação .....	86
4.2.1. Eletrificação do transporte e maquinaria pesada .....	86
4.2.2. Eletrificação de equipamentos auxiliares .....	91
4.3. Energia Elétrica Renovável .....	94
4.3.1. Produção de energia elétrica com solar fotovoltaico .....	94
4.3.2. O impulso que as comunidades de energia oferecem à competitividade no setor da pedra natural .....	99
4.3.3. Cogeração renovável .....	102
4.4. Combustíveis de Baixo Carbono .....	104
4.4.1. Biocombustíveis na descarbonização do setor da pedra natural .....	104
4.4.2. Combustíveis sintéticos na descarbonização do setor da pedra natural .....	112
4.4.3. Gases renováveis .....	119
4.5. Digitalização .....	124
4.5.1. A Digitalização e a inovação tecnológica para otimização de processos industriais e capacitação de profissionais na descarbonização da pedra natural .....	124
4.5.2. Redes de coopetição digital para a descarbonização das rochas ornamentais em Portugal .....	138
4.6. Medidas de Economia Circular .....	146
4.6.1. Exemplos de boas práticas ambientais .....	148
4.6.2. Melhoria e eficiência hídrica .....	149
4.6.3. Qualidade do ar e ruído .....	150
4.6.4. Recuperação paisagística .....	150
4.6.5. Avaliação de ciclo de vida – pegada carbono .....	151
4.7. O Sequestro de CO <sub>2</sub> no Setor da Pedra Natural: Estado de Arte e Potencialidades .....	156
4.7.1. Introdução .....	156
4.7.2. Técnicas de carbonatação mineral e meteorização estimulada .....	158
4.7.3. Carbonatação mineral e meteorização estimulada aplicadas ao setor da pedra natural .....	160
<b>5. Análise de Custo e Benefício das Medidas, Técnicas e Tecnologias .....</b>	<b>165</b>
5.1. Enquadramento .....	166
5.1.1. Evolução do uso de energia final até 2050 .....	166
5.1.2. Evolução do consumo de energia final do setor industrial até 2050 .....	168
5.2. Caracterização do Uso de Energia no Setor da Pedra Natural .....	170
5.2.1. Extração .....	170
5.2.2. Transformação .....	171
5.2.3. Caracterização geral .....	172
5.2.4. Desagregação do uso de energia por tecnologia .....	175
5.3. Principais Vetores e Tecnologias Custo-eficazes para a Descarbonização .....	176
5.3.1. Tecnologias de descarbonização .....	176
5.3.2. Vetores de descarbonização .....	177
5.3.2.1. O papel da eletricidade de base renovável .....	179
5.3.2.2. Vetores de descarbonização da extração de pedra natural .....	180
5.3.2.3. Vetores de descarbonização da transformação de pedra natural .....	182
5.4. Propostas de Trajetórias de Redução de Emissões de GEE do Setor da Pedra Natural .....	184
5.4.1. Metodologia adotada – modelo energético - OSeMOSYS .....	184

5.4.2. Pressupostos assumidos .....	185
5.4.2.1. Evolução da procura de energia útil .....	186
5.4.2.2. Custos associados ao uso de vetores (OPEX) .....	186
5.4.2.3. Licenças de carbono aplicadas aos combustíveis fósseis .....	189
5.4.3. Modelo energético para o setor da pedra natural .....	190
5.4.4. Resultados da modelação energética para o setor da pedra natural .....	192
5.4.4.1. Cenário acelerado .....	196
5.4.5. Conclusões .....	199
<b>6. Trajetória para a Neutralidade Carbónica na Extração de Areias: Percurso de Redução de Emissões, Regeneração Ambiental e Serviços de Ecossistemas .....</b>	<b>203</b>
6.1. Caracterização do Setor das Areias e Desafios de Descarbonização .....	205
6.1.1. Especificidades da extração de areias .....	205
6.1.2. Pegada carbónica específica do setor .....	206
6.1.3. Pressões regulamentares e de mercado .....	206
6.2. Trajetória para a Neutralidade Carbónica das Areias: Implementação Progressiva .....	208
6.2.1. Quantificação precisa das emissões na extração de areias .....	208
6.2.2. Integração do sequestro florestal e serviços de ecossistemas na trajetória para a neutralidade carbónica .....	208
6.2.3. Certificação e rastreabilidade específica para a trajetória da neutralidade carbónica nas areias .....	209
6.3. Benefícios Específicos da Trajetória para a Neutralidade Carbónica no Setor das Areias .....	212
6.3.1. Diferenciação no mercado de materiais de construção .....	212
6.3.2. Valorização económica do sequestro florestal e serviços de ecossistemas .....	212
6.3.3. Redução de riscos regulamentares e operacionais .....	213
6.4. Desafios Específicos e Estratégias de Mitigação na Trajetória para a Neutralidade Carbónica .....	214
6.4.1. Complexidade da quantificação em operações aquáticas .....	214
6.4.2. Gestão da variabilidade sazonal .....	214
6.4.3. Aceitação do mercado e comunicação de valor .....	215
6.5. Implementação Prática da Trajetória para a Neutralidade Carbónica no Setor das Areias .....	216
6.5.1. Desenvolvimento de parcerias estratégicas na trajetória para a neutralidade carbónica .....	216
6.5.2. Faseamento da implementação na trajetória para a neutralidade carbónica .....	216
6.5.3. Sistemas de monitorização e verificação científica e transparente .....	217
<b>7. Capacitar para a Descarbonização .....</b>	<b>223</b>
7.1. Desafios vs Oportunidades .....	225
7.2. Caminhos para a Capacitação da Força Laboral .....	226
7.3. Skills para a Adoção de Práticas de Baixo Carbono .....	228
<b>8. Considerações Finais .....</b>	<b>231</b>
<b>A. Contribuições para um Setor Mais Sustentável .....</b>	<b>235</b>
A.1. Otimização de Processos na Indústria Extrativa .....	236
A.2. Processos Sustentáveis no Transporte e Extração de Pedra .....	246
A.3. Processos e Tecnologias Sustentáveis na Extração de Pedra .....	252



# Mensagem da EUROROC

## Federação Europeia e Internacional das Indústrias de Pedra Natural

### A pedra natural rumo a um mundo sustentável

Há mais de 2,6 milhões de anos que a pedra natural é importante para a humanidade. Este material versátil deu mesmo nome ao mais longo período de desenvolvimento humano até hoje: a Idade da Pedra. Apesar da sua utilização tradicional, existe ainda potencial de melhoria nas áreas da sustentabilidade e descarbonização.

No entanto, é importante ter em conta que a utilização da pedra natural é muito reduzida, especialmente no setor da construção. Mesmo na Alemanha, a maior economia da Europa, apenas cerca de 15 000 pessoas trabalham no setor da pedra natural, desde a extração em pedreiras até à aplicação dos produtos acabados. É igualmente necessário reconhecer que a pedra natural é um produto económico sujeito às leis da oferta e da procura. Não existe uma economia circular perfeita no que toca à sustentabilidade. Contudo, é fundamental que todos os intervenientes reflitam sobre como a pedra natural pode ser utilizada de forma mais económica e sustentável, em benefício da humanidade.

Nos últimos 20 anos, a produção global de pedra natural cresceu rapidamente, especialmente em projetos de construção, onde os arquitetos têm vindo a tirar cada vez mais partido da variedade de cores, texturas e acabamentos que a pedra natural pode oferecer. E, à medida que o uso da pedra aumenta, a nossa capacidade de cortar e processar a pedra de forma mais eficiente tem levado a um aumento significativo dos tipos e das cores de materiais disponíveis no mercado.

Além da sua utilização na construção, a pedra natural é também empregue na construção de monumentos, e também como matéria-prima para esculturas, monumentos e lápides. Atualmente, sete países — China, Índia, Turquia, Irão, Itália, Brasil e Espanha — são responsáveis por cerca de dois terços da produção mundial de pedra natural. Em

geral, verifica-se uma tendência para o uso da pedra na alvenaria, no âmbito do Pacto Ecológico da União Europeia. A pedra natural deixa assim de ser apenas um material decorativo e passa a substituir materiais de construção críticos, como o cimento, o vidro e a cerâmica.

Como resultado deste aumento da procura, surge uma oportunidade para promover e expandir a indústria da pedra natural a nível mundial. Embora as perspetivas pareçam favoráveis, o desenvolvimento desta indústria depende frequentemente de fatores locais, como a localização, a qualidade e a adequação das massas minerais, bem como da disponibilidade de financiamento para construir ou expandir pedreiras de dimensão adequada, além de aspetos logísticos, como a existência de infraestruturas de transporte adequadas para ligar os produtores de pedra aos clientes.

As pedras comerciais mais utilizadas incluem o mármore, o granito, a ardósia e o arenito, todas elas apresentando uma variedade de propriedades óticas e físicas.

Qual é a principal vantagem da pedra natural? O material já está disponível e não precisa de ser transformado em material de construção através de processos complexos. Basta extrair a pedra, cortá-la na forma adequada e usá-la como material de construção para inúmeros fins. Não são necessários outros recursos em grande escala, nem a pedreira deixa uma marca permanente na natureza. Mesmo após o fim do seu ciclo de vida útil, a pedra natural pode ser reutilizada como material de construção para outras finalidades. É um material permanentemente reutilizável e, por isso, faz parte da economia circular.

Tal como acontece com toda a economia nacional, a indústria da pedra natural na Europa também

sofre com os diversos e, por vezes, contraditórios requisitos de uma burocracia que retira espaço de manobra a iniciativas económicas. É lamentável constatar que, apesar do mercado interno europeu e dos padrões comunitários de qualidade, existem regulamentos específicos de cada país que dificultam o comércio transfronteiriço. Cada país, e frequentemente até mesmo regiões individuais nos Estados-Membros, possui os seus próprios regulamentos de construção que definem as qualidades exigidas para os produtos de construção. Desta forma, estes regulamentos nacionais dificultam a utilização da pedra natural noutros países. Por exemplo, as placas fabricadas no sul de Itália não têm de ser testadas para resistência ao gelo. Contudo, esta é também uma das razões pelas quais não podem ser usadas nas regiões mais frias do norte da Europa. Mesmo na extração de pedra, existem tantos regulamentos diferentes para o uso da areia, em termos de quantidade e granulometria, que isso resulta em custos desnecessários e em desvantagens competitivas para a indústria europeia da pedra natural.

Apesar de todos estes obstáculos, a pedra natural deve ser vista como uma oportunidade económica e o seu potencial de melhoria deve ser aproveitado. O projeto Road to 2050 contribui de forma valiosa para este objetivo. A indústria europeia da pedra natural saúda o esforço dos institutos de investigação que, olhando de fora, procuram identificar potencial de melhoria em todos os aspetos. Gostaríamos de agradecer aos responsáveis por este estudo pelo seu empenho e manifestar a esperança numa evolução positiva da pedra natural como material de construção indispensável para a humanidade.

Gerd Merke  
(Secretário-geral da EUROROC)



# Prefácio

A ASSIMAGRA – Associação Portuguesa da Indústria dos Recursos Minerais apresenta o Roteiro para a Descarbonização do Setor da Pedra Natural, um documento estratégico que marca um momento decisivo na trajetória da nossa indústria rumo à sustentabilidade e à neutralidade carbónica.

Como entidade representativa do setor dos recursos minerais em Portugal, a ASSIMAGRA reconhece a transição energética como um dos pilares centrais da Quarta Revolução Industrial, a qual exige uma transformação profunda dos nossos modelos produtivos e uma revisão completa da cadeia de valor, desde a extração das matérias-primas até ao fim de vida dos produtos.

O setor da pedra natural português tem registado um percurso extraordinário nas últimas décadas, alcançando recordes de exportação e assumindo uma relevância crescente no Produto Interno Bruto nacional, beneficiando da nossa baixa dependência de matérias-primas importadas. Esta posição de força confere-nos não apenas uma vantagem competitiva, mas também uma responsabilidade acrescida no processo de transição energética e ambiental que o país e a Europa atravessam.

Este Roteiro surge no contexto dos compromissos assumidos por Portugal no âmbito do Roteiro para a Neutralidade Carbónica 2050 (RNC 2050) e dos objetivos estabelecidos no Plano Nacional de Energia e Clima 2030, bem como no Plano Europeu de Energia e Clima. Representa o culminar de um trabalho colaborativo envolvendo associações, entidades de investigação e desenvolvimento, empresas e outros intervenientes do setor, no âmbito dos projetos financiados pelo Plano de Recuperação e Resiliência (PRR).

A descarbonização do setor da pedra natural não constitui apenas uma obrigação regulamentar ou uma resposta às pressões ambientais crescentes. Representa, antes, uma oportunidade estratégica para reinventar o setor, fortalecer a sua competitividade no mercado global e posicionar Portugal como líder mundial na produção sustentável de pedra natural. A nossa visão é clara: afirmar-nos como entidade de referência nacional e internacional na liderança, dinamização e valorização da indústria portuguesa dos recursos minerais, sempre com os valores da inovação, rigor, transparência e sustentabilidade no centro da nossa atuação.

Os desafios que enfrentamos são significativos. A crise energética dos últimos anos evidenciou a vulnerabilidade do setor aos altos custos de contexto, constituindo um forte bloqueio ao desenvolvimento e à competitividade das nossas empresas.

Simultaneamente, a crescente exigência dos mercados internacionais em matéria de sustentabilidade e pegada carbónica dos produtos coloca-nos perante a necessidade urgente de adotar processos produtivos mais eficientes e sustentáveis.

Este Roteiro apresenta um caminho estruturado e pragmático para superar estes desafios, identificando as principais tecnologias de descarbonização disponíveis a curto, médio e longo prazo, desde a eletrificação dos processos e equipamentos, passando pela adoção de combustíveis hipocarbónicos e gases renováveis, até às soluções mais inovadoras de sequestro de CO<sub>2</sub> e economia circular. Mais do que um documento técnico, constitui um guia prático para as empresas do setor, fornecendo as ferramentas necessárias para calcular a pegada de carbono dos seus produtos

e implementar medidas concretas de redução de emissões.

A ASSIMAGRA compromete-se a liderar este processo de transformação, trabalhando em estreita colaboração com os nossos associados, parceiros tecnológicos e entidades públicas para garantir que o setor da pedra natural português se posiciona na vanguarda da sustentabilidade global. Acreditamos firmemente que, capacitando o setor com as ferramentas corretas e promovendo a partilha de conhecimento e sinergias entre todos os intervenientes, conseguiremos unir esforços em torno da transformação dos modelos socioeconómicos para uma exploração mais eficiente dos recursos minerais com o menor impacto ambiental possível.

O futuro do setor da pedra natural passa necessariamente pela sustentabilidade. Este Roteiro é o nosso compromisso com esse futuro – um futuro onde a excelência da pedra natural portuguesa se alia à responsabilidade ambiental, onde a inovação tecnológica serve a preservação do planeta, e onde a competitividade se constrói sobre os pilares sólidos da sustentabilidade e da economia circular.

Convidamos todos os do setor – empresários, trabalhadores, investigadores, decisores políticos e sociedade civil – a abraçar este desafio coletivo e a contribuir para a construção de uma indústria da pedra natural verdadeiramente sustentável, que honre o património geológico único de Portugal e o projete com orgulho nos mercados internacionais.

Célia Marques

(Vice-Presidente Executiva da ASSIMAGRA)







# Roteiro para a Descarbonização do Setor da Pedra Natural

# Preâmbulo

## Objetivos e âmbito do Roteiro

O **Roteiro para a Descarbonização do Setor da Pedra Natural** foi elaborado no âmbito do projeto ROAD TO 2050, financiado pelo Plano de Recuperação e Resiliência (PRR), com o objetivo de constituir um documento orientador que estabeleça diretrizes para a adoção de práticas sustentáveis no setor da pedra natural, identificando e apresentando abordagens tecnicamente viáveis, economicamente sustentáveis e socialmente aceites para a des-

carbonização. Pretende-se, assim, apoiar a tomada de decisões estratégicas para a descarbonização do setor, visando contribuir para a neutralidade carbónica até 2050, em linha com os compromissos assumidos no Pacto Ecológico Europeu e com as metas de descarbonização definidas nas políticas europeias e nacionais subsequentes.

## Pressupostos para preparação do Roteiro

O Roteiro foi estruturado e focado num plano de trabalho que visa, de uma forma detalhada, a identificação e caracterização de tecnologias e medidas existentes para a descarbonização do setor, incluindo abordagens que ainda se encontram em estágios iniciais de maturidade tecnológica, tendo sido igualmente identificadas oportunidades de melhoria, obstáculos, ameaças e barreiras que podem comprometer ou dificultar a descarbonização do setor. Esta abordagem foi integrada e alinhada com as políticas europeias e nacionais, como o Pacto Ecológico Europeu (European Green Deal), o pacote legislativo Fit for 55, a lei de Bases do Clima, o Roteiro para a Neutralidade Carbónica 2050 (RNC 2050), o Plano Nacional Energia e Clima 2030 (PNEC 2030) e suas metas.

- O Roteiro foi desenvolvido considerando as seguintes etapas principais:
- Caracterização do Setor da Pedra Natural;

- Alterações Climáticas e a Necessidade de Descarbonização;
- Evolução Prevista para o Setor até 2050: Produção, Consumos e Emissões de GEE;
- Principais Vetores de Descarbonização relevantes para o setor da Pedra Natural;
- Principais Tecnologias, Técnicas e Medidas de Descarbonização Disponíveis a Curto, Médio e Longo Prazo, até 2050;
- Análise de Custo-Benefício das Medidas, Técnicas e Tecnologias;
- Propostas de Trajetórias Custo-Eficientes de Reduções de Emissões de GEE do Setor, para 2030, 2040 e 2050 – Cenários;
- Necessidades e Expectativas Atuais e Futuras.







**01.**

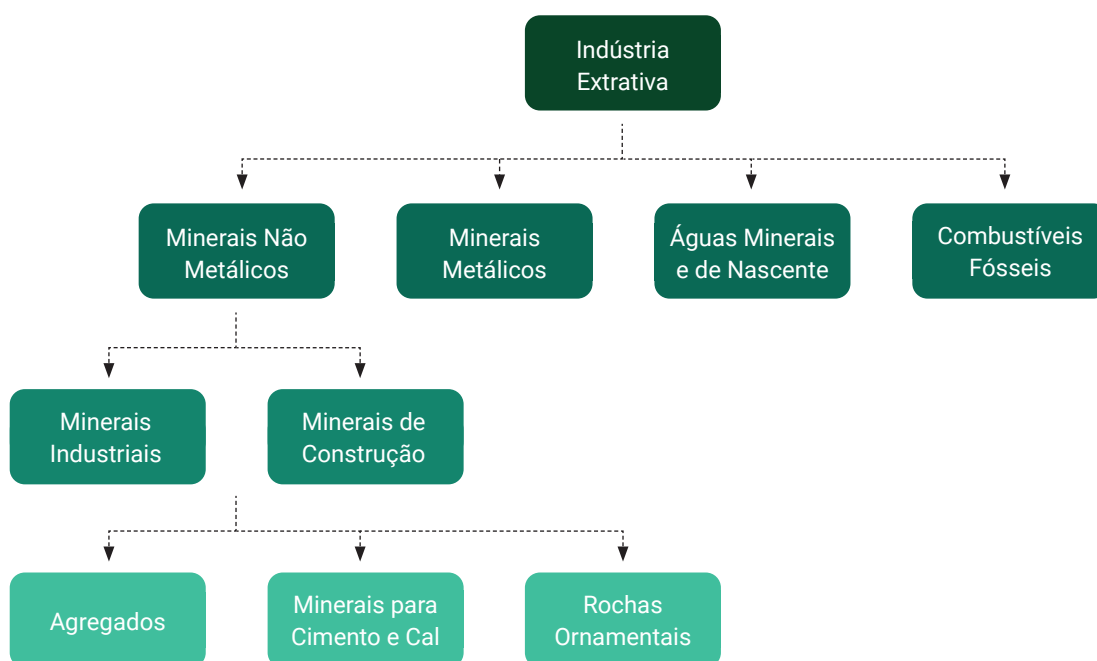
# Caracterização do Setor da Pedra Natural

# 1. Caracterização do Setor da Pedra Natural

## 1.1. A Indústria Extrativa em Portugal

Na indústria extrativa podem-se considerar quatro grandes subsetores de atividade económica dependendo dos recursos extraídos: Minerais Metálicos,

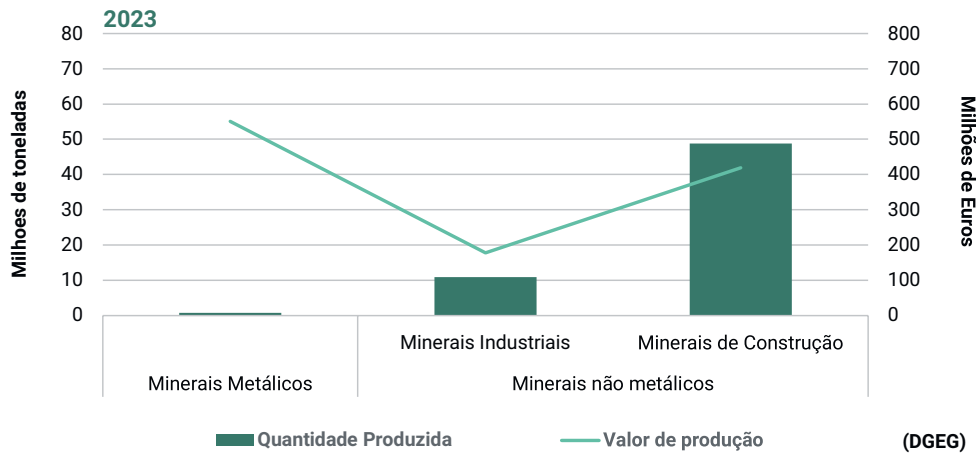
Minerais Não-Metálicos, Águas Minerais e de Nascente e Combustíveis Fósseis (Figura 1.1).



► Figura 1.1. Subsetores da indústria extrativa (Fonte: DGEG [1]).

O subsetor dos Minerais Não Metálicos subdivide-se nos subsetores Minerais Industriais e Minerais para Construção. O subsetor de **Minerais Industriais** inclui a extração de argilas comuns e especiais (caulino), areias siliciosas, sal-gema, quartzo e feldspato, usadas como matérias-primas ou subsidiária em diversas indústrias, nomeadamente na indústria cerâmica, do vidro ou agroalimentar. O subsetor de **Minerais de Construção** abrange os **Agregados**, onde se incluem areias comuns, saibros e pedra britada, e os **Minerais para Cimento e Cal**, como calcário e gesso, e as **Rochas Ornamentais**, que incluem granito, mármore, calcários, xisto e ardósia.

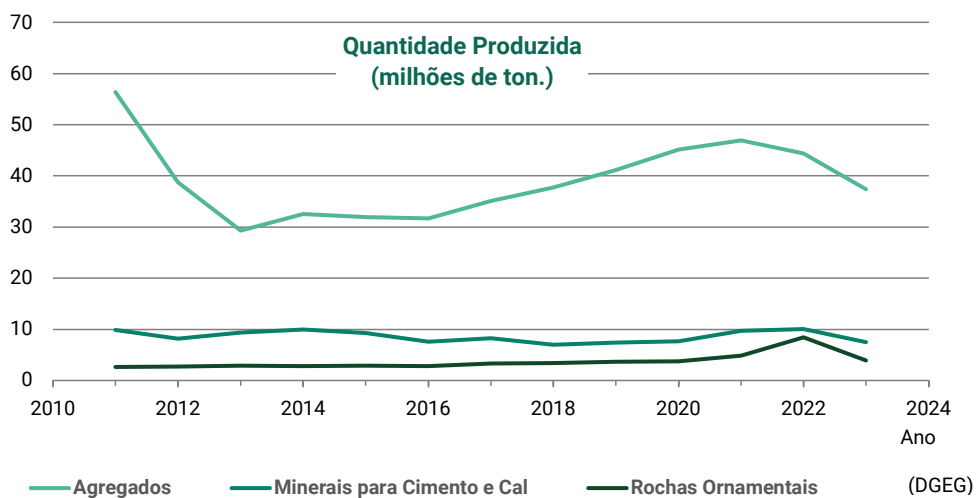
Analisando o mercado da indústria extrativa em Portugal (Figura 1.2), em particular os recursos provenientes de minas e pedreiras verifica-se que os Minerais de Construção são os recursos produzidos em maior quantidade. No entanto, embora os Minerais Metálicos sejam produzidos em menor quantidade do que os Minerais Não Metálicos, o valor de produção é muito superior quando comparado com os Minerais Industriais, e situa-se na mesma ordem de grandeza dos Minerais de Construção.

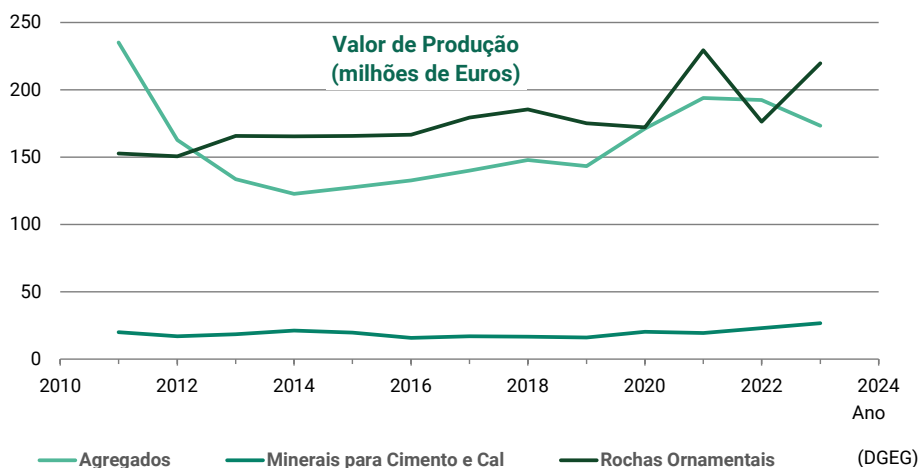


► Figura 1.2. Quantidade produzida e respetivo valor de produção dos recursos minerais provenientes de minas e pedreiras, em Portugal, em 2023 (Fonte: DGEG [1]).

Nos Minerais de Construção, destaca-se o subsector dos Agregados pela maior quantidade produzida. No entanto, o subsector das Rochas Ornamentais apresenta valores de produção semelhante aos re-

gistados nos Agregados, apesar da quantidade extraída ser significativamente inferior, o que reflete o maior valor acrescentado associado às Rochas Ornamentais (Figura 1.3).

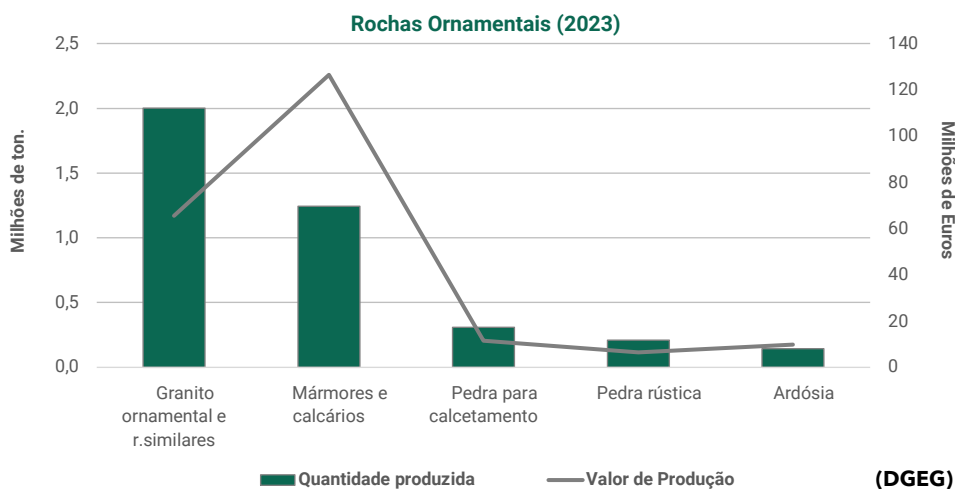




► Figura 1.3. Quantidade produzida e valor de produção dos Minerais de Construção entre 2011 e 2023 (Fonte: DGEG [1]).

Em Portugal, o setor das rochas ornamentais engloba cerca de 200 tipos comerciais de rochas, envolvendo aproximadamente 700 locais de extração em atividade. Este setor económico é dividido nos

seguintes subgrupos de pedra natural: mármore e calcários, granitos e rochas afins, xistos e ardósias, pedra para calcetamento e pedra rústica (Figura 1.4).

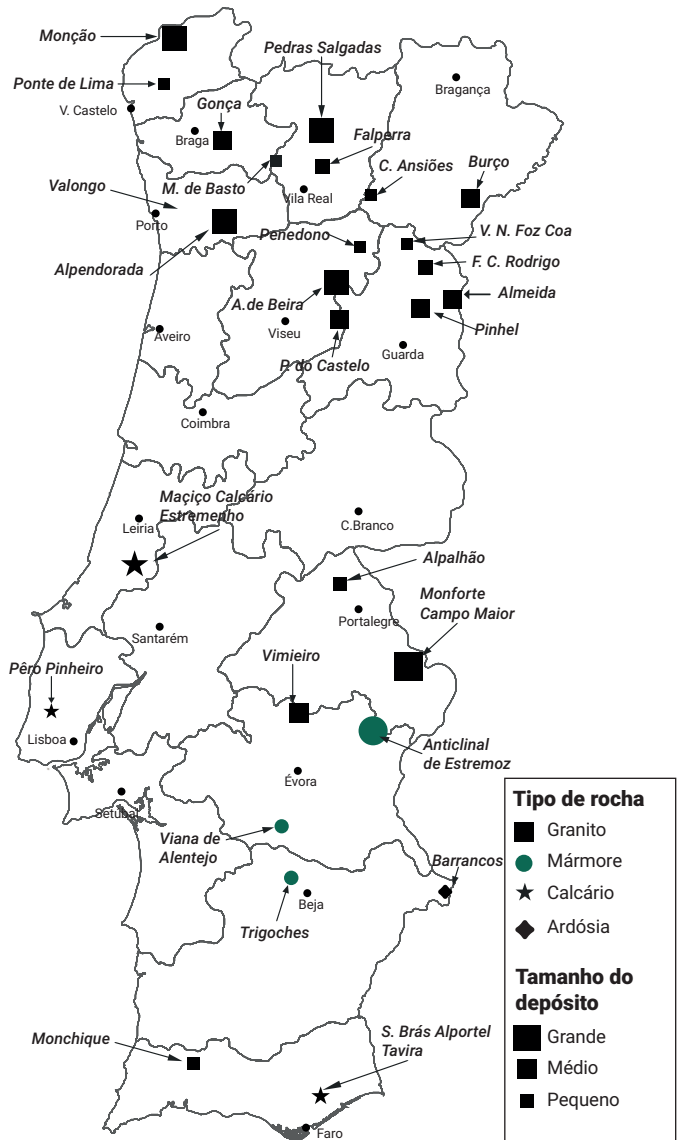


► Figura 1.4. Quantidade produzida e valor de produção de diferentes tipos de rochas ornamentais, em Portugal, em 2023 (Fonte: DGEG [1]).

A exploração de cada tipo de rocha ornamental depende da sua disponibilidade natural. Assim, em função das características geológicas do país, existem regiões onde a exploração de determinados tipos de rocha é mais predominante (Figura 1.5).

Os granitos apresentam diferentes texturas e tonalidades, tendem a ser mais explorados no Norte e Centro Interior do país, existindo vários núcleos produtores reconhecidos quer pela qualidade das suas jazidas quer pela sua dimensão.

Os calcários predominam na Orla Meso-Cenozóica Ocidental, uma faixa essencialmente sedimentar, cujos núcleos extrativos se localizam no Maciço Calcário Estremenho e apresentam tonalidade creme. Na zona de Lisboa ocorrem os calcários microcristalinos. No Alentejo encontram-se diversas rochas ornamentais de elevada qualidade, destacando-se os mármore. Os mármore, branco, rosado e bege, são extraídos na zona de Sousel-Estremoz-Borba-Vila Viçosa. A ardósia localiza-se na região de Valongo e os xistos em Vila Nova de Foz Coa, e no Alentejo nas regiões de Mourão e Barrancos [3]. No Algarve encontram-se rochas ígneas de carácter alcalino, incluindo granitos e sienitos associados sobretudo ao maciço de Monchique, embora com menor expressão extrativa.



► Figura 1.5. Avaliação qualitativa das massas minerais de rocha ornamental em Portugal (adaptado de Carvalho et al., 2013 [1]).

## 1.2. Pedra Natural: da Extração à Transformação

O setor da pedra natural abrange as empresas dedicadas à extração de rocha para fins ornamentais e industriais e as empresas responsáveis pela sua transformação, havendo também empresas que integram ambas as atividades, extração e transformação. As rochas para fins ornamentais são, por sua vez, extraídas em blocos ou placas, e posteriormente cortadas e beneficiadas. As rochas para fins industriais, por sua vez, são geralmente extraídas e processadas em granulometrias específicas, consoante a aplicação a que se destinam.

As principais áreas de aplicação da pedra natural incluem pavimentos e revestimentos, interiores e exteriores, assim como a produção de peças isoladas como esculturas; tampos, balcões, pés de mesa e lápides para arte funerária.

Embora cada empresa adote um processo produtivo ajustado às características da matéria-prima e do produto final, esses processos apresentam, geralmente, operações unitárias e auxiliares comuns, exigindo equipamentos semelhantes. A seguir, descrevem-se de forma simplificada as principais etapas dos processos de extração e transformação da pedra natural.

### Extração

A extração de blocos de rochas ornamentais pode ocorrer tanto por via de lavra a céu aberto, como por lavra subterrânea, existindo ainda explorações em que a extração pode ocorrer em ambiente misto. Em Portugal a atividade extrativa realiza-se predominantemente em pedreiras a céu aberto, ou seja, com lavra à superfície, o que reflete a natureza acessível das jazidas e as condições geomorfológicas do território.

A extração de pedra natural é precedida de uma fase de preparação da pedreira que inclui operações de **decapagem do terreno**, para remoção das camadas superficiais do solo (vegetação, terras,

argilas, cascalho) que recobrem o maciço rochoso e, em certos casos, o **desmonte de formas de relevo cárstico como cabeças ou lápias** para chegar à rocha sã e maciça, adequada para extração. A utilização de corte por fio diamantado tem vindo a substituir a utilização de explosivos, devido aos diversos tipos de constrangimentos no seu uso e manuseio e inerente legislação.

Da etapa de extração obtém-se blocos de arestas aproximadamente retangulares, e de dimensões que permitem maximizar o aproveitamento da rocha e otimizar as condições operacionais na fase de transformação.



► Figura 1.6. Diagrama simplificado da fase de extração de pedra natural.



A **perfuração** é o primeiro passo de extração e fundamental para a definição da frente da pedra, através da abertura de caixas e canais para delimitar a área de extração e isolar as talhadas, sendo geralmente usadas máquinas perfuradoras, de acionamento pneumático ou hidráulico (Figura 1.7)

A separação da talhada do maciço rochoso é realizada através de **operações de corte**, o método mais comum, ou, alternativamente, com o uso de explosivos. Entre as técnicas de corte atualmente disponíveis, destaca-se o corte com fio diamantado, frequentemente utilizado pela sua precisão e eficiência.

► Figura 1.7. Máquina perfuradora para efetuar furos verticais ou horizontais na bancada, ou furos numa talhada para a realização de blocos (Fonte: Epiroc [4]).

Após a realização das perfurações adequadas, o fio diamantado é inserido nos furos, sendo depois accionado pela máquina de corte, que o faz deslizar em movimentos contínuos através da rocha, sendo utilizada água para arrefecimento do fio. Os segmentos diamantados desgastam gradualmente a rocha criando um corte preciso. O consumo de água depende do tipo de rocha, da velocidade da máquina e das características do fio utilizado.

Segue-se o **dsmonte da talhada**, que consiste no derrube controlado da talhada, que pode ser realizado através de almofadas ou colchões de ar ou água pressurizadas que inseridas em frestas expandem e tombam a talhada. Em rochas menos fraturadas, pode recorrer-se a um tomba-bancadas hidráulico para facilitar o derrube.

No **pré-corte** o(s) bloco(s) obtidos são cortados para redução de tamanho, de modo a viabilizar o

seu transporte. Após esta etapa, pode seguir-se uma fase de **esquartejamento** com o objetivo de realizar uma nova redução do tamanho e uniformizar as dimensões dos blocos, facilitando o seu transporte e as fases subsequentes de transformação.

Na fase de **remoção**, a frente de desmonte é limpa com o auxílio de uma pá carregadora ou uma escavadora giratória. Segue-se o **transporte** dos blocos para **embalamento** e posteriormente para **expedição** ou encaminhamento para as unidades de transformação de pedra. Os materiais inertes ou escombros são encaminhados para as escombrireas. Uma parte significativa destes materiais representa subprodutos com potencial de valorização, permitindo maximizar o aproveitamento do recurso extraído e reduzir os desperdícios ao longo do processo produtivo.

## Transformação

Os blocos de rocha extraídos são transportados para as unidades de transformação de pedra e armazenados no parque de blocos, onde se inicia o processo de transformação. Este processo inclui a receção, pesagem e identificação dos blocos, além de operações de carga e descarga.

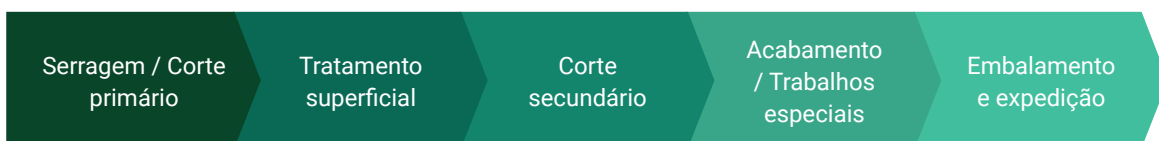
A transformação de rochas ornamentais envolve diferentes etapas e processos que variam conforme o produto final desejado. Geralmente, o processo produtivo é semelhante, tanto para rochas carbonatadas quanto para granitos e rochas similares, com diferenças principalmente nos tipos de equipamentos utilizados em alguns processos.



► Figura 1.8. Máquina de corte com fio diamantado para extração de granito [5].

Na etapa de **serragem/corte primário**, o bloco, previamente aparelhado, é convertido em chapas ou placas. Equipamentos do tipo multilâminas ou mul-

tifios diamantados encontram-se normalmente no início da linha de produção de uma fábrica de transformação de pedra.



► Figura 1.9. Diagrama simplificado da fase de transformação da pedra natural.



► Figura 1.10. Máquina multifio para corte, com fio diamantado, de blocos em chapas com espessuras variáveis. Fonte: Breton [6].

As chapas ou placas obtidas são sujeitas a **tratamento superficial**, como polimento, bujardado, flamejado ou resinado, entre outros.

O **corte secundário** das placas permite a produção de alguns produtos finais, como mosaicos e ladrilhos, com dimensões definidas, através de equipamentos de corte automatizados.

O **acabamento** é realizado para realçar as características naturais da pedra, aumentando a sua valorização comercial. As unidades de transformação possuem áreas dedicadas a **trabalhos especiais**, como bancadas de cozinha, rodapés, lápides funerárias, revestimentos de fachadas, utilizando equipamentos manuais e automáticos, incluindo tecnologias avançadas como CNC e corte por jato de água, entre outras.

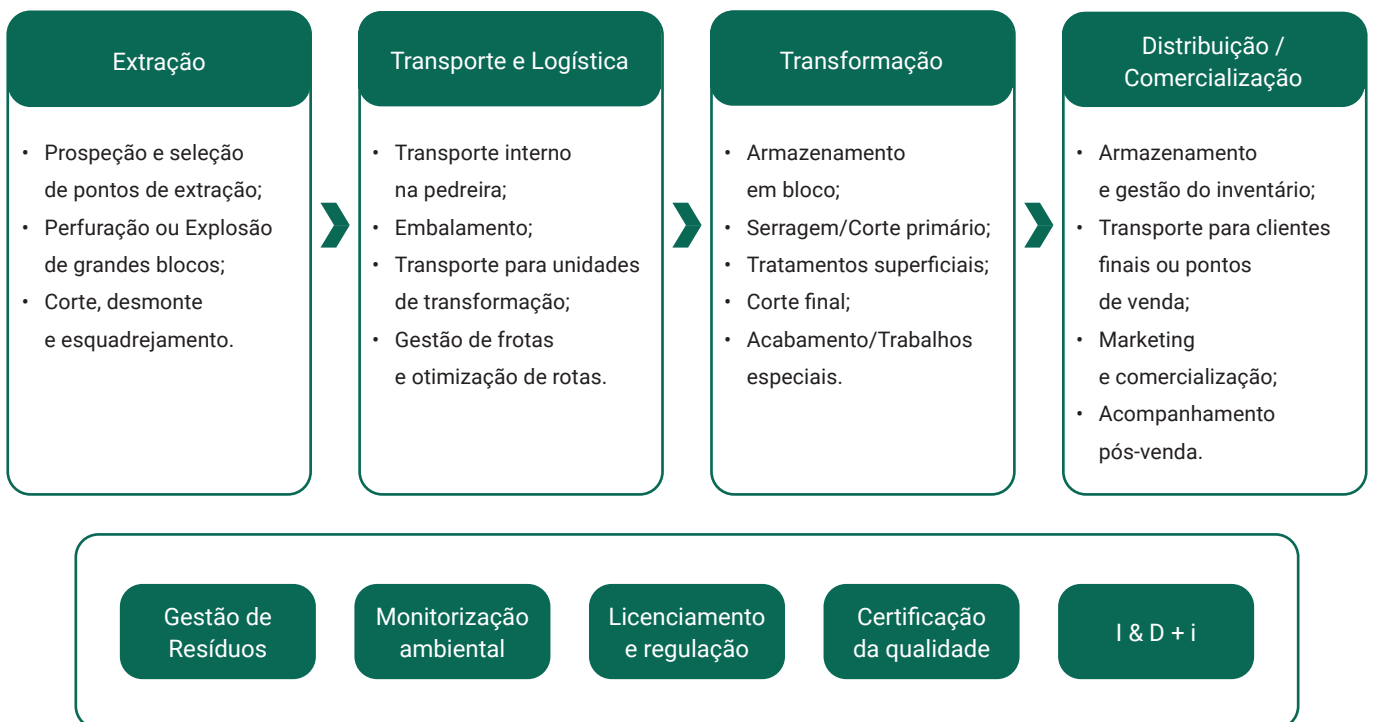
Após a etapa de acabamento, segue-se o **embalamento** e a **expedição** dos produtos finais acabados.

A par da extração e transformação da pedra natural, o processo de extração de areias constitui uma outra vertente fundamental da indústria dos minerais não metálicos. À semelhança do que acontece nas pedreiras, a produção de areias assenta na identificação de depósitos geológicos adequados, na preparação da área, no desmonte do material, no transporte até à unidade de transformação/processamento, que no setor das areias envolve lavagem, crivagem e classificação granulométrica, seguida de eventual secagem do material, e posterior armazenamento e/ou expedição. Ambas as atividades extrativas estão sujeitas normas ambientais rigorosas e a planos de recuperação e reabilitação paisagística, que envolvem várias práticas comuns, nomeadamente, a modelação do terreno, reposição do solo, revegetação, gestão de águas, controlo da erosão, redução de poeiras e ruído, e valorização de resíduos e subprodutos.

### 1.3. Cadeia de Valor da Pedra Natural

A cadeia de valor do setor da pedra natural integra um conjunto de etapas interligadas, que transformam recursos minerais em produtos de alto valor acrescentado para a construção, decoração, mobiliário, entre outras aplicações. Cada etapa, desde a **extração, transporte e logística, transformação** até à **distribuição** e comercialização do produto final desempenha um papel essencial na eficiência produtiva, na qualidade do produto final e na sustentabilidade do processo (Figura 1.11).

Para além das etapas centrais, existem também atividades de suporte que reforçam a competitividade do setor, onde se incluem: a **gestão de resíduos, a monitorização ambiental, licenciamento e regulação, certificação da qualidade e investigação e inovação tecnológica**. Embora não resultem diretamente em produtos, estas atividades são fundamentais para fortalecer a confiança do mercado, aumentar a sustentabilidade e criar condições para a valorização plena da pedra natural como recurso estratégico.



► Figura 1.11. Cadeia de valor da pedra natural.

## Referências

- [1]. Direção-Geral de Energia e Geologia, DGEG. [Online]. Disponível em: <https://www.dgeg.gov.pt/>
- [2]. J. M. F. Carvalho, J. V. Lisboa, A. C. Moura, C. I. Carvalho, L. M. O. Sousa, e M. M. Leite, "Evaluation of the Portuguese ornamental stone resources," *Key Eng. Mater.*, vol. 548, pp. 3–9, 2013.
- [3]. A. Moura e J. L. Velho, *Recursos Geológicos de Portugal*, 1st ed. Palimage, 2012, ISBN: 978-989-703-017-8.
- [4]. Epiroc. "Surface drill rigs," Epiroc. [Online]. Disponível em: <https://www.epiroc.com/pt-pt/products/drill-rigs/surface-drill-rigs>
- [5]. Hardware Egypt, "Wire saw machine," Hardware Egypt. [Online]. Disponível em: [https://hardwareegypt.com/products\\_old/wire-saw-machine/](https://hardwareegypt.com/products_old/wire-saw-machine/)
- [6]. Breton, "Breton Paragon," Breton. [Online]. Disponível em: [https://breton.it/pt\\_eu/products/m%C3%A1quinas-e-linhas/breton-paragon](https://breton.it/pt_eu/products/m%C3%A1quinas-e-linhas/breton-paragon)

## 1.4. Evolução do Setor em Termos de Produção, Governance e Sustentabilidade

Isabel Duarte de Almeida

ISCTE

O setor da pedra natural tem vindo a afirmar-se como uma componente estrutural da economia portuguesa, com impacto significativo em diversos territórios, nomeadamente no Alentejo, no Centro e no Norte do país. A sua relevância ultrapassa a dimensão económica direta, contribuindo também para a coesão territorial, a preservação do património cultural e a valorização de recursos geológicos únicos.

A evolução do setor nas últimas décadas tem sido marcada por profundas transformações. Por um lado, a modernização dos processos produtivos e a progressiva internacionalização abriram novas oportunidades de mercado e aumentaram a exigência em termos de qualidade, inovação e eficiência. Por outro, a emergência de preocupações

ambientais, sociais e de transparência na gestão colocaram em evidência a necessidade de uma nova abordagem integrada, onde a produção, a *governance* e a sustentabilidade se reforçam mutuamente [1].

Esta secção aborda, de forma articulada, estas três dimensões. Analisa a evolução do setor em termos de produção – desde as transformações tecnológicas à mudança no perfil dos produtos – reflete sobre a maturação dos modelos de *governance* empresarial e associativa, e explora os caminhos já iniciados e os desafios por enfrentar na transição para um modelo mais sustentável, resiliente e competitivo.

### 1.4.1. Da extração tradicional à inovação produtiva

#### 1.4.1.1. Transformações estruturais nas últimas décadas

O setor da pedra natural português tem raízes históricas profundas, ligadas à construção e ao património, mas a sua transformação mais acentuada iniciou-se na década de 1980, com a integração de Portugal na então Comunidade Económica Europeia. A abertura aos mercados europeus e o acesso a programas de financiamento estruturais impulsionaram o investimento em maquinaria, capacitação técnica e internacionalização.

Durante as décadas seguintes, assistiu-se a uma reconfiguração progressiva das empresas do setor. A atividade deixou de se concentrar quase exclusi-

vamente na extração de pedra bruta, evoluindo para uma lógica de maior valor acrescentado, através da transformação e do desenvolvimento de produtos diferenciados. A capacidade de corte, acabamento e personalização tornou-se central para a competitividade, permitindo responder a novas exigências de clientes nacionais e internacionais, com destaque para os mercados da construção, arquitetura e design.

Esta mudança foi acompanhada por um aumento da escala produtiva e por uma progressiva organização dos processos internos. A adoção de nor-

mas de qualidade, a melhoria do controlo sobre os processos e a especialização das unidades produtivas contribuíram para uma maior previsibilidade e consistência na entrega de produto final, reforçando a reputação do setor no mercado global.

Neste contexto, o setor das Rochas Ornamentais (RO) consolidou-se como um verdadeiro cluster industrial, integrando uma cadeia de valor que abrange desde a exploração em pedreiras até à transformação, hoje amplamente suportada por maquinaria e ferramentas de elevada sofisticação tecnológica. Segundo dados da ASSIMAGRA (2024) [1], este cluster representa mais de 18.800 empregos diretos, distribuídos por 2.260 empresas, com exportações para 116 países. Portugal ocupa a 9ª posição no comércio internacional do setor, sendo

o segundo país a nível mundial em comércio internacional per capita, e regista um volume de exportações 823% superior ao das importações. Estes indicadores evidenciam o contributo significativo das RO para o emprego nas regiões do interior e para o reforço da balança comercial portuguesa.

O crescimento da indústria portuguesa das RO no mercado global tem sido ainda impulsionado por dinâmicas mais amplas, como a crescente valorização das atividades ao ar livre, a rápida urbanização e o aumento dos projetos de renovação e reabilitação em economias emergentes — fatores esses que têm vindo a alargar a procura internacional por pedra natural transformada de qualidade (Figura 1.12).



► Figura 1.12. Principais fatores, tendências e mercados da indústria portuguesa de Rochas Ornamentais [2].

A procura por rochas ornamentais deve-se, em grande medida, às suas vantagens reconhecidas no setor da construção, nomeadamente a maior durabilidade, os custos reduzidos de manutenção e o menor impacto ambiental. Para além disso, a diversidade de cores e texturas torna estas rochas esteticamente apelativas e particularmente ade-

quadas para projetos de reabilitação. A capacidade de adaptação de Portugal às exigências dos mercados internacionais, aliada à elevada qualidade das matérias-primas disponíveis, reforça a sua posição como um dos principais protagonistas no comércio mundial da pedra.

#### 1.4.1.2. Transformação tecnológica e digitalização dos processos

Nas últimas duas décadas, o setor tem vindo a incorporar tecnologias que transformaram significativamente os processos de extração e transformação da pedra natural. A introdução de maquinaria de corte automatizado, equipamentos de controlo numérico (CNC), linhas de polimento mais eficientes e sistemas robotizados contribuiu para o aumento da precisão, da segurança e da produtividade.

A digitalização começa também a ganhar espaço em várias etapas do processo produtivo. **softwares** de modelação tridimensional, sistemas de informação geográfica (SIG), drones para mapeamento topográfico e plataformas integradas de planeamento de lavra são hoje ferramentas que algumas empresas já utilizam para melhorar o conhecimen-

to geológico, otimizar a extração e reduzir perdas de matéria-prima.

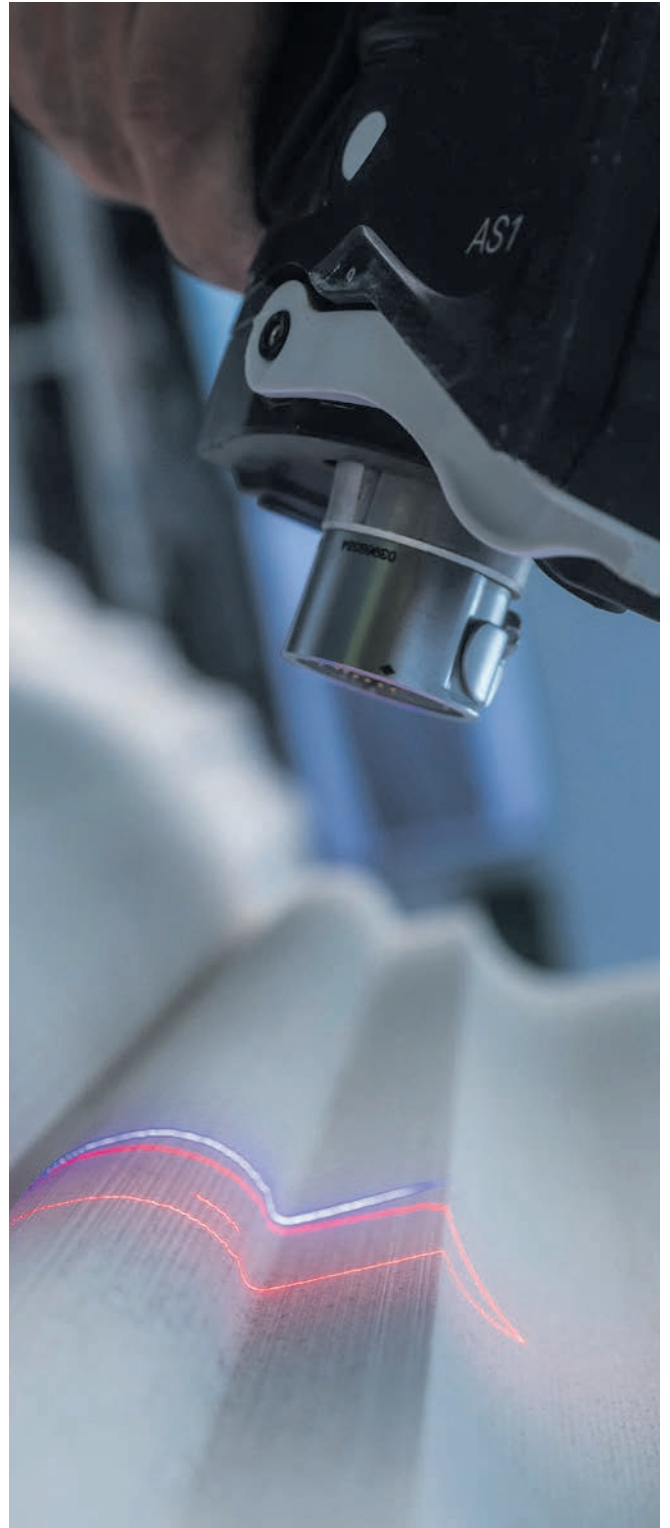
Embora o nível de adoção destas tecnologias ainda varie significativamente entre empresas, sobretudo em função da sua dimensão e capacidade de investimento, é clara a tendência para uma modernização gradual do setor. A digitalização não só permite ganhos de eficiência como facilita o controlo ambiental e a rastreabilidade dos produtos – aspetos cada vez mais valorizados pelos mercados e reguladores.

#### 1.4.1.3. Mudança no perfil de produto e novos mercados

A evolução tecnológica tem estado intimamente ligada à diversificação e sofisticação dos produtos. O setor da pedra português passou a oferecer soluções tecnológicas e avançadas cada vez mais adaptadas a projetos exigentes de arquitetura e design, tanto em contextos públicos como privados

[3]. A pedra natural deixou de ser vista apenas como um material de construção pesada, assumindo um papel de destaque em componentes de elevada qualidade estética e funcional, como fachadas ventiladas, revestimentos interiores, pavimentos técnicos ou mobiliário urbano.

Esta evolução permitiu conquistar nichos de mercado em geografias mais distantes e exigentes, como o Médio Oriente, a América do Norte ou mercados asiáticos. Em paralelo, verifica-se também um crescente interesse por parte de setores criativos, como a arte contemporânea e o *design* industrial, que valorizam a versatilidade da pedra portuguesa e a sua ligação ao território [4].



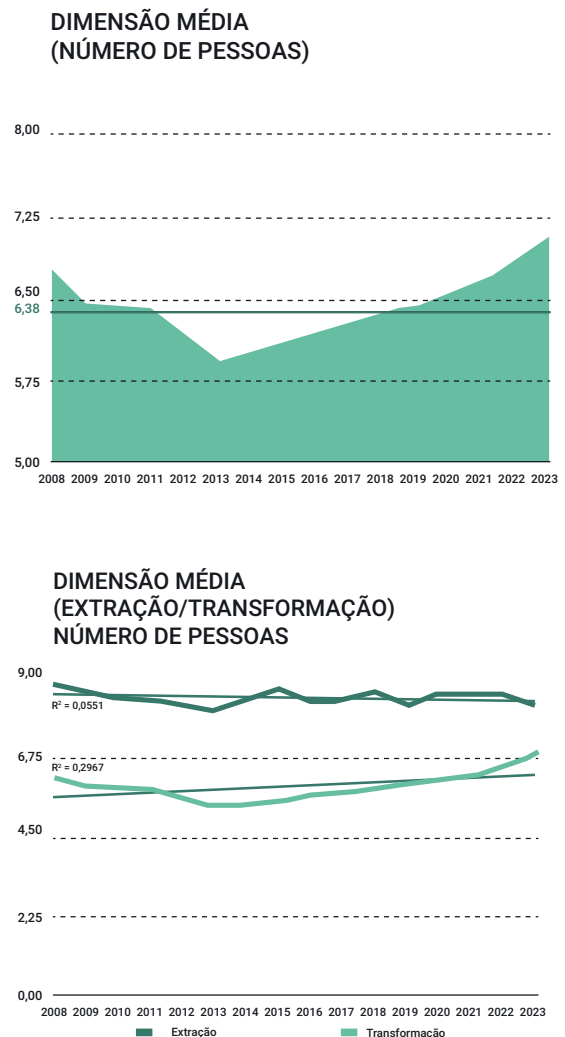
### 1.4.1.4. Desafios atuais na produção

Apesar dos avanços registados, o setor enfrenta desafios estruturais que exigem atenção continuada [5]. A gestão eficiente dos recursos geológicos, a redução da pegada ambiental da produção e a necessidade de aumentar a produtividade sem comprometer a qualidade constituem preocupações centrais.

Por sua vez, a escassez de mão de obra qualificada tem sido um grande desafio para a modernização do setor da pedra em Portugal. Este problema é especialmente significativo em áreas técnicas e tecnológicas, onde a necessidade de profissionais competentes é essencial para implementar novas tecnologias e otimizar processo, como é o caso das empresas do setor. Muitas têm uma dificuldade significativa em atrair ou reter talento devido à competição com outros setores ou à falta de formação especializada na região.

A escassez de mão de obra tem implicações na eficiência e na produtividade, situação que se aplica neste setor. Sem profissionais qualificados, as empresas enfrentam dificuldades para operar maquinaria avançada, utilizar software de última geração ou aplicar métodos inovadores de extração e processamento. Como consequência, há perda de matéria-prima, aumentos de custos operacionais

e uma menor capacidade de resposta às exigências do mercado. Além disso, a expansão do setor é também limitada por este problema, dificultando a capacidade das empresas de crescer e explorar novas oportunidades, apesar da ligeira melhoria observada nas empresas de transformação da pedra (Figura 1.13).



► Figura 1.13. Evolução da dimensão média das empresas de extração e transformação (Fonte: ASSIMAGRA, 2024 [1]).

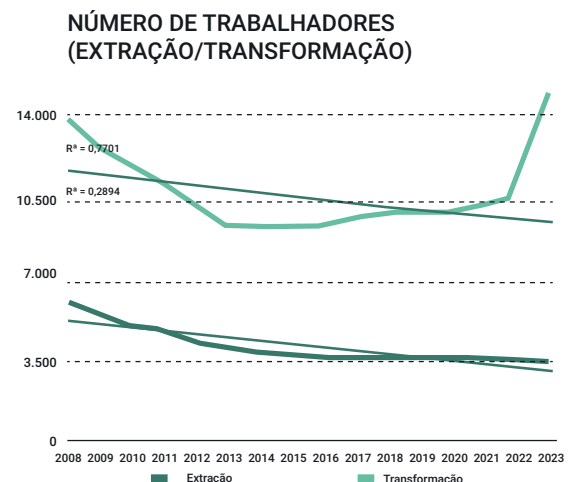
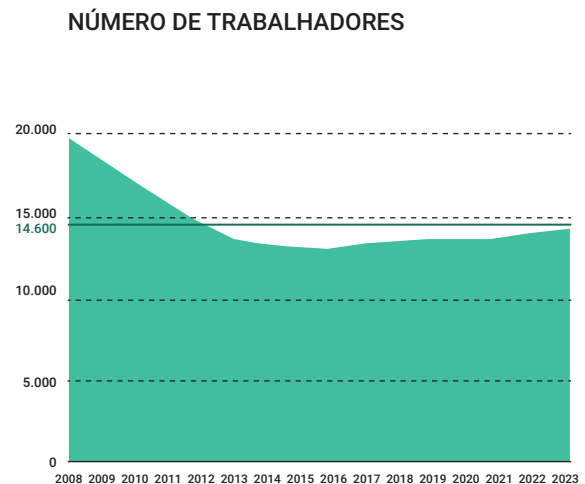
A volatilidade dos custos energéticos, a dependência de mercados externos e as exigências crescentes em matéria de *compliance* ambiental colocam pressão sobre as empresas, em particular sobre as PME com menor capacidade de investimento. A

transição para um modelo produtivo mais sustentável e tecnologicamente avançado exige, por isso, políticas de apoio, acesso facilitado à inovação e instrumentos de financiamento adequados à realidade do setor [2].

### 1.4.2. Da gestão familiar à governança estratégica

#### 1.4.2.1. Estrutura empresarial e modelos de gestão predominantes

O tecido empresarial do setor da pedra natural em Portugal é maioritariamente composto por pequenas e médias empresas, muitas das quais têm origem familiar e operam há várias gerações. Esta estrutura, embora tenha permitido uma ligação forte ao território e ao saber-fazer local, também gerou alguns constrangimentos ao nível da gestão estratégica, da captação de talento e da capacidade de adaptação a novas exigências do mercado. Os dados relativos às empresas de extração (Figura 1.14) são reveladores desta dificuldade.



► Figura 1.14. Distribuição do número de trabalhadores entre os segmentos de extração e transformação (Fonte: ASSIMAGRA, 2024 [1]).

Ainda assim, nos últimos anos, tem-se assistido a uma evolução progressiva nos modelos de gestão, com um número crescente de empresas a reconhecer a importância da profissionalização, da organização interna e da planificação a médio e longo prazo. A sucessão geracional tem sido, em muitos

casos, um ponto de inflexão, abrindo espaço à introdução de práticas de gestão mais estruturadas, à valorização da formação em engenharia, gestão e sustentabilidade, e à adoção de ferramentas digitais de apoio à decisão [2].

#### 1.4.2.2. Governance setorial e associativismo

Paralelamente à transformação interna das empresas, o setor tem beneficiado de uma dinâmica associativa forte, com destaque para o papel desempenhado pela ASSIMAGRA – Associação Portuguesa da Indústria dos Recursos Minerais – e pela *Associação Cluster Portugal Mineral Resources (ACPMR)*. Estas entidades têm promovido o diálogo com o poder político, a representação institucional em fóruns nacionais e internacionais, e a criação de iniciativas estratégicas conjuntas.

O associativismo tem sido também uma plataforma importante para o desenvolvimento de projetos colaborativos, nomeadamente ao nível da inovação, da qualificação de recursos humanos e da promoção internacional do setor [6]. A participação em consórcios, redes europeias e agendas mobilizadoras tem permitido reforçar a capacidade de influência e aumentar a escala de atuação de muitas empresas, superando limitações individuais.

#### 1.4.2.3. Tendências de maturação na *governance*

À medida que se intensificam as exigências normativas e *reputacionais*, as empresas do setor são chamadas a adotar práticas de *governance* mais robustas. A implementação de códigos de conduta, políticas de *compliance*, sistemas de gestão certificados e estruturas de reporte não financeiro começa a ganhar relevância, sobretudo entre empresas com presença internacional.

A *governance* no setor tende, assim, a evoluir de uma lógica centrada na operação para uma abordagem mais estratégica e integrada. Esta transformação implica não só novas competências internas, mas também um reposicionamento da liderança empresarial, que passa a ser avaliada não apenas pelos resultados financeiros, mas também pelos impactos ambientais, sociais e éticos das suas decisões.

#### 1.4.2.4. Relação com políticas públicas e planeamento estratégico

Outro vetor relevante de evolução prende-se com a maior participação do setor nos processos de construção de políticas públicas e planeamento estratégico nacional [7]. A presença ativa em roteiros setoriais, como o presente Roteiro da pedra natural, ou em iniciativas de transição climática e digitalização industrial, reflete uma crescente maturidade institucional e capacidade de articulação com os objetivos do país e da União Europeia.

Com a intensificação da concorrência a nível global, a pressão crescente das alterações climáticas e o aumento da atenção dedicada à responsabilidade social, as empresas exportadoras sentem-se cada vez mais compelidas a posicionar os seus produtos em mercados novos e dinâmicos, enfrentando simultaneamente diversos desafios de natureza ambiental e social. Nesta perspetiva, a relação

entre sustentabilidade corporativa e intensidade de exportação tem ganho uma importância crescente, uma vez que a exportação representa uma opção estratégica para a internacionalização das empresas, proporcionando-lhes um elevado nível de flexibilidade para entrarem em novos mercados e ajudando-as a alcançar os seus objetivos financeiros [8].

Esta evolução da *governance*, nas suas múltiplas dimensões, constitui um pilar fundamental para o posicionamento futuro do setor da pedra natural, contribuindo para a sua credibilidade, competitividade e resiliência num contexto global cada vez mais exigente.

#### 1.4.3. Sustentabilidade: de desafio a vantagem competitiva

##### 1.4.3.1. De obrigação a estratégia: a viragem da sustentabilidade

A sustentabilidade deixou de ser uma preocupação marginal ou meramente reativa no setor da pedra natural. Nos últimos anos, tem emergido como um eixo estratégico para a viabilidade e a competitividade das empresas, impulsionada por fatores regulatórios, exigências de mercado e mudanças nas expectativas sociais.

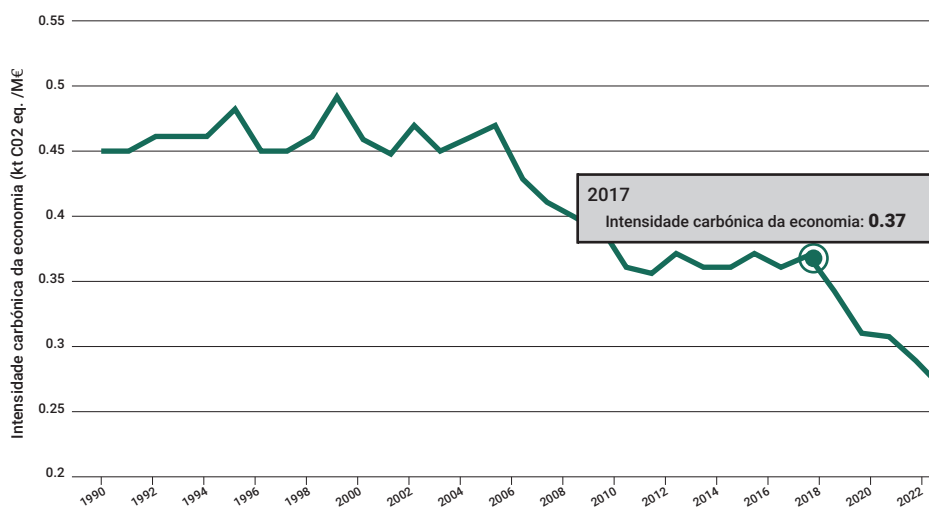
Portugal tem como meta reduzir os gases com efeito de estufa (GEE) entre 18% e 23% até 2020 e entre 30% e 40% até 2030 [9]. De acordo com os dados analisados, Portugal conseguiu reduzir as emis-

sões de CO<sub>2</sub> em cerca de 35%, mas o volume de produção mineral diminuiu significativamente, passando de 1,4 Mt para 0,6 Mt [10]. Portugal é um dos países potencialmente mais afetados pelas alterações climáticas [11], pelo que a maioria dos setores da economia pode evidenciar ganhos significativos em eficiência energética e na utilização de recursos [12].

Uma análise das emissões de GEE por unidade de Produto Interno Bruto (PIB) mostra que uma tendência de dissociação entre o PIB e as emissões

teve início em 2005, como resultado da descarbonização da economia – ou seja, uma economia com menos emissões de carbono por cada unidade de

riqueza produzida, particularmente a partir de 2017, tendência essa que se tem mantido (Figura 1.15).



► Figura 1.15. Intensidade carbônica da economia, em Portugal (Fonte: APA, 2024 [13]).

A transição para práticas mais sustentáveis resulta de múltiplas pressões: o endurecimento das normas ambientais, a crescente valorização de critérios ESG por parte de investidores e clientes, a necessidade de reduzir custos operacionais e, cada

vez mais, a consciência do impacto ambiental e social da atividade industrial. Para muitas empresas do setor, a sustentabilidade passou a ser entendida não como um custo adicional, mas como um investimento necessário para garantir futuro [2].

### 1.4.3.2. Iniciativas em curso: caminhos de mudança

Algumas empresas portuguesas da pedra natural têm já em marcha projetos e práticas que demonstram uma adesão efetiva aos princípios da sustentabilidade [1], [14]. Estas iniciativas, ainda que não generalizadas, indicam uma mudança de paradigma possível e replicável, nomeadamente:

- Eficiência energética: têm sido adotadas soluções como a substituição de equipamentos por versões de menor consumo, a implementação de sistemas de monitorização e gestão de energia, e o aproveitamento de fontes renováveis, como a energia solar fotovoltaica,

sobretudo em unidades industriais de maior dimensão.

- Reutilização de água: em contexto de escassez hídrica, várias empresas implementaram sistemas de circuito fechado para o tratamento e reutilização da água de processo, reduzindo o consumo e os efluentes.
- Valorização de resíduos: resíduos de corte e polimento, outrora descartados como subprodutos, começam a ser reaproveitados em

processos de enchimento, argamassas ou mesmo como matéria-prima para novas linhas de produto, em articulação com princípios de economia circular.

- Recuperação ambiental e paisagística: em pedreiras desativadas ou em fase de encerramento, têm sido desenvolvidos planos de recuperação que valorizam a biodiversidade local, a segurança dos espaços e, em alguns casos, a criação de áreas de lazer ou interpretação ambiental.

#### 1.4.3.3. Sustentabilidade e certificação: tendências emergentes

Embora a certificação de sistemas de gestão ambiental (ISO 14001), de energia (ISO 50001) ou de responsabilidade social ainda seja incipiente no setor, há sinais de crescente adesão, sobretudo por parte de empresas exportadoras. A certificação surge não apenas como uma exigência de mercado, mas também como um instrumento de melhoria interna e de estruturação de processos [15], [16].

A medição da pegada de carbono dos produtos e processos, assim como a adoção de metodologias de Avaliação de Ciclo de Vida (ACV), começa a entrar na agenda das empresas mais inovadoras.

Estas ferramentas permitem não só conhecer o impacto ambiental real das operações, mas também comunicar de forma credível com clientes, investidores e reguladores.

A lógica ESG – *Environmental, Social and Governance* – começa também a informar decisões de investimento e financiamento, com instituições financeiras e fundos a integrarem critérios de sustentabilidade nas suas análises de risco. Neste contexto, o setor da pedra natural não pode ficar à margem [17].

#### 1.4.3.4. Barreiras à mudança e a sustentabilidade como ativo competitivo

Apesar dos avanços registados, a transição para modelos sustentáveis enfrenta obstáculos concretos. Entre os principais destaca-se a dificuldade de acesso a financiamento para investimento em tecnolo-

gias limpas, especialmente por parte de PME com menor margem de manobra. A ausência de incentivos fiscais ou mecanismos específicos para apoiar a inovação verde limita a escala das iniciativas.

A escassez de conhecimento técnico interno sobre temas como descarbonização, economia circular ou reporte ESG é outro entrave relevante. A formação contínua, a partilha de boas práticas e a criação de redes de suporte técnico e científico serão essenciais para apoiar as empresas nesta transformação.

A nível cultural, persiste ainda alguma resistência à mudança em segmentos mais tradicionais, onde os imperativos da sustentabilidade são vistos como complexos, onerosos ou afastados das preocupações imediatas. Promover a consciencialização e demonstrar o retorno do investimento em sustentabilidade são passos-chave para desbloquear esta visão.

#### 1.4.4. Perspetivas futuras e conclusão

##### 1.4.4.1. Visão para 2040-2050: um setor mais resiliente, sustentável e inovador

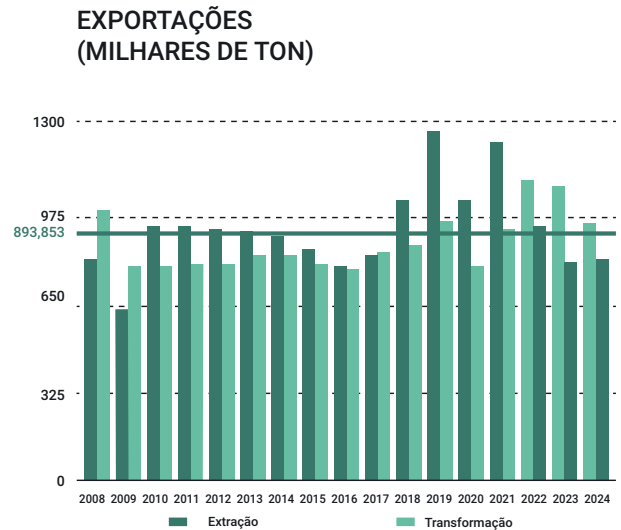
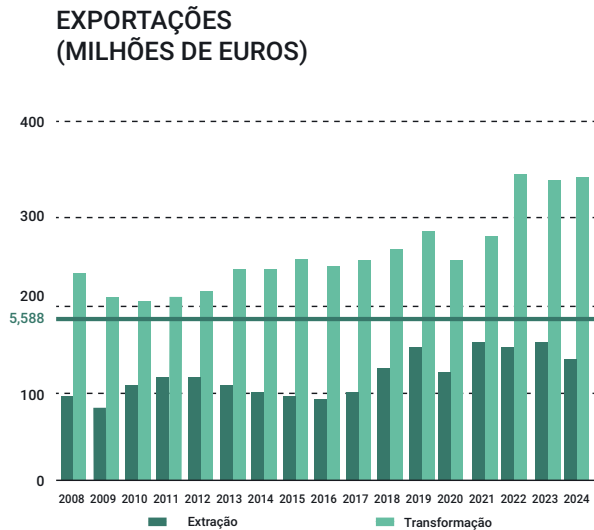
A próxima década será determinante para o posicionamento do setor da pedra natural português num mercado global em rápida transformação. A digitalização, a descarbonização, a circularidade e a responsabilidade social não serão apenas tendências, mas condições essenciais de permanência e competitividade.

Esta exigência de transformação estrutural não se verifica apenas no plano interno das organizações. A análise das exportações do setor da pedra natural português (Figura 1.16) evidencia com clareza

Por seu lado, mais do que uma obrigação, a sustentabilidade pode afirmar-se como um ativo distintivo do setor da pedra natural português. A ligação profunda entre a pedra, o território e o património cultural confere ao setor uma identidade única, que pode e deve ser potenciada através de narrativas de responsabilidade, circularidade e valorização local.

A integração da sustentabilidade como valor central na produção, na gestão e na comunicação pode abrir portas a novos mercados, atrair talento jovem, fortalecer alianças estratégicas e gerar maior aceitação social da atividade. Este é o novo horizonte do setor, e ele começa a ser trilhado, pedra a pedra.

a importância crescente da criação de valor acrescentado: embora o volume exportado em toneladas tenha permanecido relativamente estável ao longo dos anos, é o segmento da transformação que lidera em valor económico gerado. Este desfasamento entre volume e valor reforça a necessidade de apostar em estratégias assentes na inovação, sustentabilidade e diferenciação — pilares que sustentam a competitividade futura do setor.



► Figura 1.16. Evolução das exportações do setor da pedra natural (Fonte: ASSIMAGRA, 2024 [1]).

Espera-se que a produção evolua para modelos mais flexíveis, eficientes e adaptados às exigências de clientes cada vez mais conscientes do impacto ambiental dos materiais que utilizam. A aposta em produtos com valor acrescentado, apoiados em design sustentável e diferenciação estética, será um caminho promissor. Em paralelo, a crescente incorporação de tecnologias digitais, como a inteligência artificial, o *machine learning* ou a monitorização em tempo real, poderá otimizar os processos e gerar ganhos de produtividade e rastreabilidade.

Na *governance*, a tendência será para uma gestão mais estratégica, colaborativa e transparente. Modelos de governança orientados por princípios ESG, com estruturas de planeamento e reporte robustas, ganharão terreno. Por outro lado, a partilha de conhecimento, a cooperação interempresarial e o envolvimento em redes nacionais e internacionais tornar-se-ão elementos-chave para enfrentar os desafios da transição ecológica e digital.

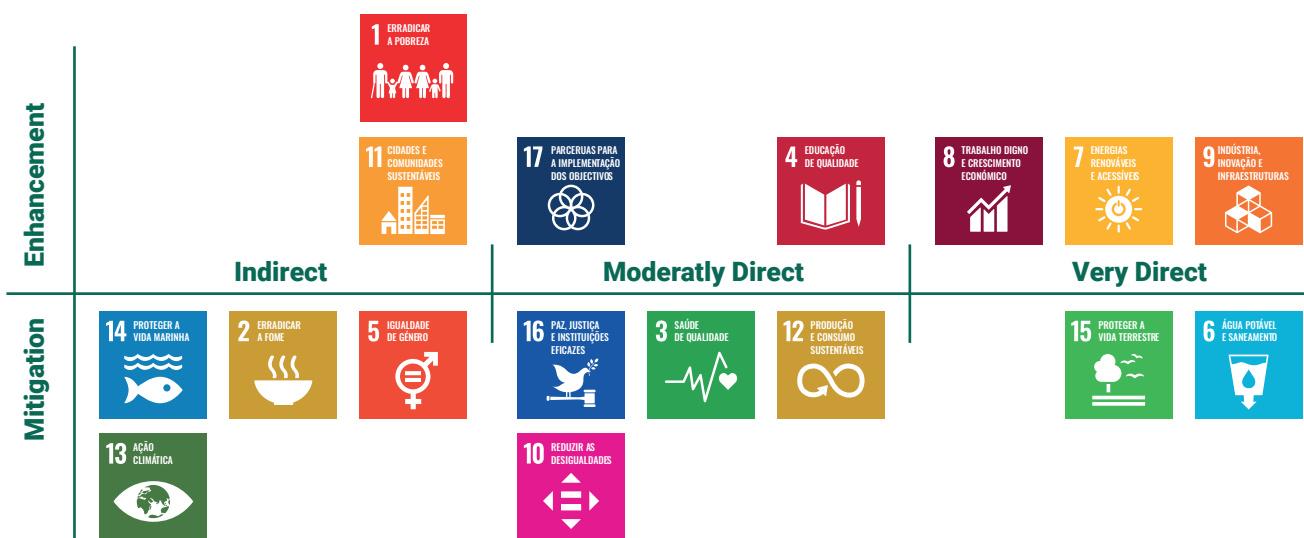
A sustentabilidade, por sua vez, deixará definitivamente de ser uma dimensão periférica para se tornar o centro da estratégia empresarial. A integração dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) nas decisões de gestão, a valorização do território e a procura ativa por soluções regenerativas, e não apenas mitigadoras, abrirão caminho para novas formas de criar valor.

Neste contexto, vale a pena recordar que o Conselho Internacional de Mineração e Metais (ICMM) definiu 10 princípios que sustentam o desenvolvimento sustentável na indústria extrativa e que se articulam com os ODS, incluindo, principalmente, compromissos com a proteção da biodiversidade, o respeito pelos direitos humanos e a contribuição para o desenvolvimento sustentável [18].

Por sua vez, e de acordo com o relatório do UNEP *Mineral Resource Governance in the Twenty-First Century: Gearing Extractive Industries Towards Sus-*

*tainable Development* [19], o setor extrativo pode influenciar todos os 17 ODS. Esta ligação entre a indústria extrativa e os ODS está amplamente documentada e pode ser representada de forma gráfica

através do grau de influência – direta ou indireta – que o setor pode exercer sobre cada um dos 17 Objetivos, conforme ilustrado na Figura 1.17.



► Figura 1.17. Grau de influência do setor extrativo sobre os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), segundo a sua relação com mitigação ou reforço de impactos [19].

Ao abordar a evolução do setor em termos de sustentabilidade, importa considerar não apenas as práticas implementadas no plano empresarial, mas também os enquadramentos internacionais que moldam as exigências futuras do setor extrativo.

As práticas extrativas, na sua generalidade, criam oportunidades, desafios e riscos para o desenvol-

vimento sustentável, sendo essencial destacar os fundamentos da sustentabilidade. Os minerais são essenciais para o bem-estar humano e fundamentais para praticamente todos os setores da economia, no entanto, a mineração também coloca desafios críticos e riscos à sustentabilidade a longo prazo.

#### 1.4.4.2. Recomendação estratégica: valorizar o que nos distingue

Num setor com raízes tão fortemente ligadas ao território e ao património, a diferenciação passará por saber conjugar tradição e inovação. A pedra portuguesa é reconhecida pela sua qualidade, beleza e versatilidade – atributos que devem ser reforçados através de uma produção sustentável, de uma *governance* responsável e de uma narrativa que valorize o que nos distingue: a história, a paisagem e o saber-fazer local.

Investir em competências, promover alianças estratégicas, comunicar de forma transparente e apostar na inovação colaborativa serão passos decisivos para afirmar o setor como exemplo de transição sustentável e competitiva no contexto europeu.

#### 1.4.4.3. Consideração final

O setor da pedra natural enfrenta hoje uma encruzilhada: manter práticas consolidadas num contexto em mudança ou assumir com determinação o desafio da transformação. A experiência acumulada, a resiliência demonstrada e os primeiros passos já dados na digitalização e sustentabilidade mostram que o caminho é possível – e que há vontade para o trilhar.

Esta secção procurou dar conta desse percurso em construção, valorizando os progressos alcançados, identificando os obstáculos ainda presentes e sinalizando as oportunidades futuras. Cabe agora ao setor – empresas, associações, instituições e territórios – consolidar esta trajetória e fazer da pedra portuguesa um símbolo de futuro responsável, inovador e duradouro.

## Referências

- [1]. ASSIMAGRA - Associação Portuguesa dos Industriais dos Recursos Minerais, 2024. [Online]. Disponível em: <http://www.assimagra.pt/>
- [2]. I.C. d. Almeida e A. A. d. Silva, "Boosting sustainability: R&D mobiliser projects in Portuguese ornamental stone companies," *European Journal of Applied Business Management*, vol. 10, n° 1, pp. 142 - 170, 2024. [Online]. Disponível em: [https://doi.org/10.58869/EJABM10\(1\)/07](https://doi.org/10.58869/EJABM10(1)/07)
- [3]. A da Silva e I. Almeida, "Towards INDUSTRY 4.0 | A case STUDY in Ornamental Stone Sector," *Resources Policy*, vol. 67, p. 101672, 2020. [Online]. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2020.101672>
- [4]. A da Silva, "Industrial processes optimization in digital marketplace context: A case study in ornamental stone sector," *Results in Engineering*, vol. 7, p. 100152, 2020. [Online]. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2020.100152>
- [5]. J. Carvalho, C. Lopes, A. Mateus, L. Martins e M. Goulão, "Planning the future exploitation of ornamental stones in Portugal using a weighed multi-dimensional approach," *Resources Policy*, vol. 59, pp. 298 - 317, 2018. [Online]. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2018.08.001>
- [6]. L. Lopes, M. Peres, M. Goulão, L. Martins e I. Frazão, "Portugal Mineral Resources Cluster: Collective Strategy for Sectoral Recognition and Sustainable Development," *Key Engineering Materials*, vol. 848, pp. 101 - 108, 2020. [Online]. Disponível em: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.848.101>
- [7]. M. Aksoy, M. K. Yilmaz, I. Golgeci, E. Tatoglu, M. Canci e A. E. Hizarci, "Untangling the Influence of Corporate Sustainability on Export Intensity: The Moderating Role of R&D Intensity," *Journal of International Marketing*, vol. 32, n° 4, pp. 38 - 57, 2023. [Online]. Disponível em: <https://doi.org/10.1177/1069031X231214233>
- [8]. C. Costa, L. F. Lages e P. Hortinha, "The bright and dark side of CSR in export markets: Its impact on innovation and performance," *International Business Review*, vol. 24, n° 5, pp. 749 - 757, 2015. [Online]. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ibusrev.2015.01.008>
- [9]. Portugal, Conselho de Ministros, "Resolução do Conselho de Ministros n° 53/2020, de 10 de julho, que aprova o Plano Nacional de Energia e Clima 2021 - 2030 (PNEC 2030)," 2020.
- [10]. Transport Decarbonisation Alliance, [Online]. Disponível em: <https://tda-mobility.org/tda-member-portugal/>
- [11]. J. Camargo, I. Barcena, P. M. Soares, L. Schmidt e J. Andaluz, "Mind the climate policy gaps: climate change public," *Climate Changes*, vol. 161, pp. 151 - 169, 2020. [Online]. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10584-019-02646-9>
- [12]. "Roteiro para a Neutralidade Carbónica 2050 (RNC2050)," [Online]. Disponível em: [https://unfccc.int/sites/default/files/resource/RNC2050\\_PT-22-09-2019.pdf](https://unfccc.int/sites/default/files/resource/RNC2050_PT-22-09-2019.pdf)
- [13]. "REA - Portal do Estado do Ambiente," 2024. [Online]. Disponível em: <https://rea.apambiente.pt/content/intensidade-energ%C3%A9tica-da-economia>
- [14]. "Cluster Portugal Mineral Resources," [Online]. Disponível em: <https://www.clustermineralresources.pt/>
- [15]. J. S. Blyde, "The Impact of ISO 14001 environmental standards on exports," *Inter-American Development Bank Integration and Trade Sector*, 2021. [Online]. Disponível em: <https://publications.iadb.org/publications/english/document/The-Impact-of-ISO-14001-environmental-standards-on-exports.pdf>
- [16]. OECD, "Greening SMEs and entrepreneurs: Policy guidance for environmental sustainability," OECD Publishing, 2021.
- [17]. A. Dall-Orsoletta, B. Verrier, M. Uriona-Maldonado, G. G. Dranka e P. Ferreira, "How does social acceptance affect transition minerals production in Europe? A system approach and case study in Portugal," *The Extractive Industries and Society*, vol. 22, p. 101625, 2025. [Online]. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.exis.2025.101625>
- [18]. ICMN, "Enhancing mining's contribution to society," *The International Council on Mining and Metals. Annual Review*, 2016.
- [19]. United Nations Environment Programme & International Resource Panel, *Mineral Resource Governance in the 21st Century: Gearing Extractive Industries towards Sustainable Development*, 2020.





# 02.

## Alterações Climáticas e a Necessidade de Descarbonização



## 2. Alterações Climáticas e a Necessidade de Descarbonização

### 2.1. Descarbonização no Setor da Pedra Natural: um Contributo para o Futuro da Competitividade Europeia

Jorge Cristino

Especialista em Sustentabilidade e Ação Climática

Partner da Get2C

#### A Saúde Planetária e as Alterações Climáticas

Apesar da enorme preocupação comum com as alterações climáticas, como de resto demonstram os inquéritos realizados aos cidadãos e às empresas, e igualmente refletidos no ordenamento jurídico internacional, ainda não se verificam os saltos quânticos necessários para uma ação que reflita uma eficácia nos resultados para os objetivos traçados, sobejamente conhecidos, nomeadamente do Acordo de Paris, de não ultrapassar os 2 °C de aquecimento médio global, preferencialmente 1,5 °C, face à era pré-industrial.

A Agenda 2030, com 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), distribuídos por 169 metas, teve curiosamente, a sua avaliação política na Assembleia-Geral das Nações Unidas, em 2023, onde se constatou que o Mundo está muito aquém das conquistas desenhadas e ambicionadas por todos. Na verdade, a meio do seu percurso, apenas 15% das metas estão dentro do esperado e muitas delas, 37%, têm vindo a regredir ou estão estagnadas. Isto, ao ponto de ter sido estabelecida uma **declaração política** conjunta, para acelerar a implementação da Agenda 2030, a fim de impulsionar o desenvolvimento económico sustentável e o bem-estar para todas as pessoas, ao mesmo tempo que se protege o ambiente.

Os números globais, publicados no **relatório** intercalar em junho de 2023, são impressionantes e devem fazer-nos pensar: 1,2 mil milhões de pessoas vivem na pobreza, 680 milhões vivem à fome, sendo que estes números têm vindo a crescer em vez de dimi-

nuir. 2,2 mil milhões de pessoas não têm água potável e 3,5 mil milhões não têm saneamento gerido de forma segura. Na presente década, perto de 1,1 mil milhões de pessoas vivem em “bairros de lata”, nas áreas urbanas, maioritariamente nas megacidades, com maior incidência na África Subsariana (onde é previsto o maior crescimento demográfico) estimando-se que mais de 2 mil milhões vivam em condições semelhantes nos próximos 30 anos.

O mesmo acontece com outros objetivos. Quando falamos de Ação Climática, em que as emissões globais de gases de efeito de estufa (GEE), em 2023 atingiram 53,0 Gt CO<sub>2</sub>eq<sup>1</sup> (sem AFOLU<sup>2</sup>). Os dados de 2023 representam o nível mais elevado registado e com um aumento de 1,9 %, isto é, mais 994 Mt CO<sub>2</sub>eq em comparação com os níveis de 2022, tornando-se cada vez mais difícil atingir os objetivos do Acordo de Paris, de 1,5 °C.

É fundamental ter noção de que já vamos com 1,2 °C acima da era pré-industrial, quando temos a necessidade de reduzir abruptamente 45% das emissões até 2030.

Se olharmos detalhadamente para a performance de cada região do mundo, verificamos claramente que existe uma União Europeia dedicada a implementar um Pacto Ecológico Europeu, através de uma transição energética, justa e ecológica, como são exemplo a lei da biodiversidade ou do restauro da natureza, que visa inverter o declínio da sua perda e obriga os estados-membros a restaurar e

reparar os ecossistemas danificados, de forma a garantir uma transição ecológica, ou o projeto de leis das matérias-primas críticas, que pretende aumentar a reciclagem de materiais e diminuir a dependência do exterior no fornecimento de matérias-primas essenciais para a transição energética. Há ainda a registar a diretiva para reporte de sustentabilidade corporativo, que leva as empresas a fornecerem obrigatoriamente dados não financeiros e a estabelecerem as suas metas ESG, bem como aplicarem uma análise de dupla materialidade.

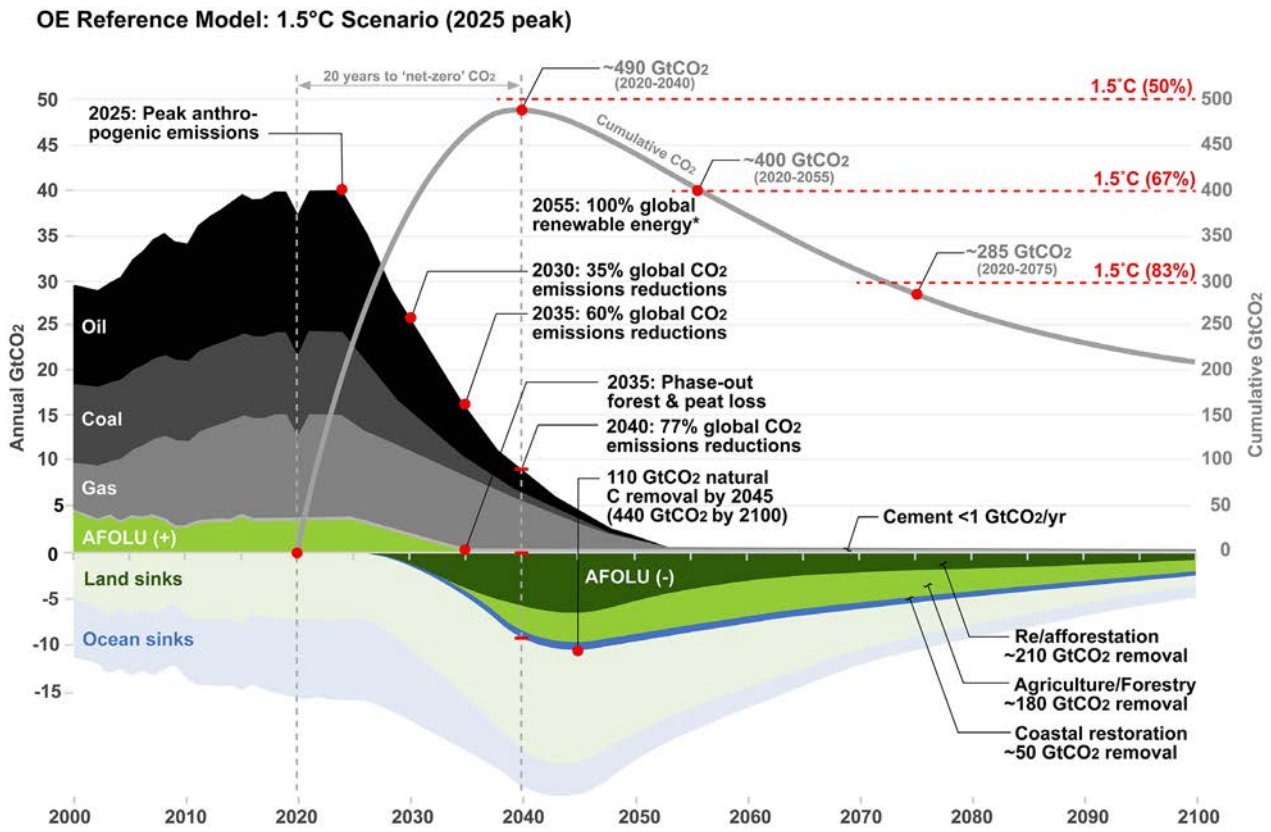
E é assim porque as empresas, e em particular o setor industrial, são essenciais no combate às alterações climáticas, pois podem, através da sua ação, contribuir ativamente para a **saúde planetária**. Nomeadamente através da mitigação às alterações climáticas, reduzindo emissões, através da aposta numa transição para as energias renováveis, principalmente através do autoconsumo, da

transição para gases renováveis, eletrificação de equipamentos e promoção de uma eco logística. Ou, mesmo na transformação de hábitos para uma vida saudável junto dos seus trabalhadores, como uma alimentação sustentável e de mobilidade suave e criação de conceitos de proximidade. O mesmo acontece se apostarem num contributo para o aumento do sequestro de emissões, aumentando os espaços verdes/azuis e apostando numa interação urbano-industrial-rural, indo mesmo além do seu *offsetting*.

Por outro lado, a implementação de um processo de descarbonização não passa só por estabelecer metas e indicadores, mas também por um processo de capacitação, formação e sensibilização transversal, bem como de aposta na investigação, conhecimento e inovação tecnológica.

1 Dióxido de carbono equivalente

2 Agricultura, floresta e outros usos do solo



► Figura 2.1. Modelo de Referência *One Planet* [1], de 2022, limita a temperatura média global a 1,5 °C acima dos níveis industriais iniciais (c.1850-1900), com um pico nas emissões antropogénicas cumulativas de aproximadamente 500 GtCO<sub>2</sub> em 2045 (acima dos níveis de 2020).

### O que fazer no setor da Pedra Natural

Assim, a descarbonização na indústria da extração e transformação da pedra natural deve ter por objetivo reduzir as emissões de carbono e minimizar o impacto ambiental associado da sua atividade, bem como relacionar com a produção de materiais de construção. É inegável que as pedreiras são uma importante fonte de recursos naturais para a

construção (gerando postos de trabalho diretos e indiretos), contudo, intensiva em gastos de energia, de elevada exigência logística e complexidade, dada a evolução no conhecimento e investigação, sendo por isso necessário extrair de forma responsável e sustentável.

Como tal, são várias as estratégias e tecnologias que podem ser usadas para promover a descarbonização na indústria deste setor. Na energia:

- Uso de energia por fontes renováveis;
- Gestão e eficiência energética;
- Veículos e equipamentos elétricos ou mais eficientes quando não é possível eliminar os combustíveis fósseis, podendo nalguns casos utilizar gases renováveis;
- Segurança energética e autonomia, prevendo possibilidades de acumulação de energia;
- Na tecnologia, conceção do produto, nos resíduos e no acesso aos recursos;
- Pesquisar e desenvolver produtos mais sustentáveis e melhorar o *design*, pode diminuir a pegada de carbono da indústria;
- Estudar o recurso com recurso à tecnologia e à digitalização (inovação);
- Gestão de resíduos e de processos industriais, aumentando a circularidade, aproveitando matérias-primas secundárias e criando subprodutos.

Reduzir o desperdício da pedra e desenvolver estratégias de reciclagem ou reutilização de resíduos da extração pode minimizar o impacto ambiental. A análise do ciclo de vida dos produtos e materiais e a sua rastreabilidade são formas de acrescentar valor ao produto e à indústria, e consequentemente à economia nacional, quer em termos de marca de origem e de circularidade de produtos e subprodutos.

Por outro lado, este setor poderá ser essencial na implementação de tecnologias de sequestro de carbono, que permitam capturar e armazenar emissões de CO<sub>2</sub> geradas durante o processo de produção, ou de outros setores industriais, podendo ser uma solução para reduzir as emissões – com aproveitamento de grutas ou outras estruturas geológicas que sejam hábeis em *CCS – Carbon Capture and Storage*.

Por fim, o que contar em termos de regulamentação e incentivos, bem como na estabilidade política. A União Europeia, os governos e órgãos reguladores deverão continuar a promover a descarbonização por meio de políticas e incentivos, como é o exemplo de impostos sobre carbono, créditos de carbono, mercados voluntários e regulamentos em relação às emissões.



► Figura 2.2. Pacote de medidas estratégicas do Pacto Ecológico Europeu.

## A oportunidade do ROAD to 2050

A descarbonização na indústria da extração e transformação da pedra natural não é apenas benéfica para o ambiente e o clima, mas também pode proporcionar poupança de custos e melhorar a imagem das empresas no mercado, atendendo à crescente procura e necessidade por práticas mais sustentáveis. Não é um *nice to have*, mas um *must to have*. É importante que as empresas do setor invistam em investigação e desenvolvimento de tecnologias limpas e adotem práticas mais sustentáveis para enfrentar os desafios ambientais e contribuir para um futuro mais sustentável.

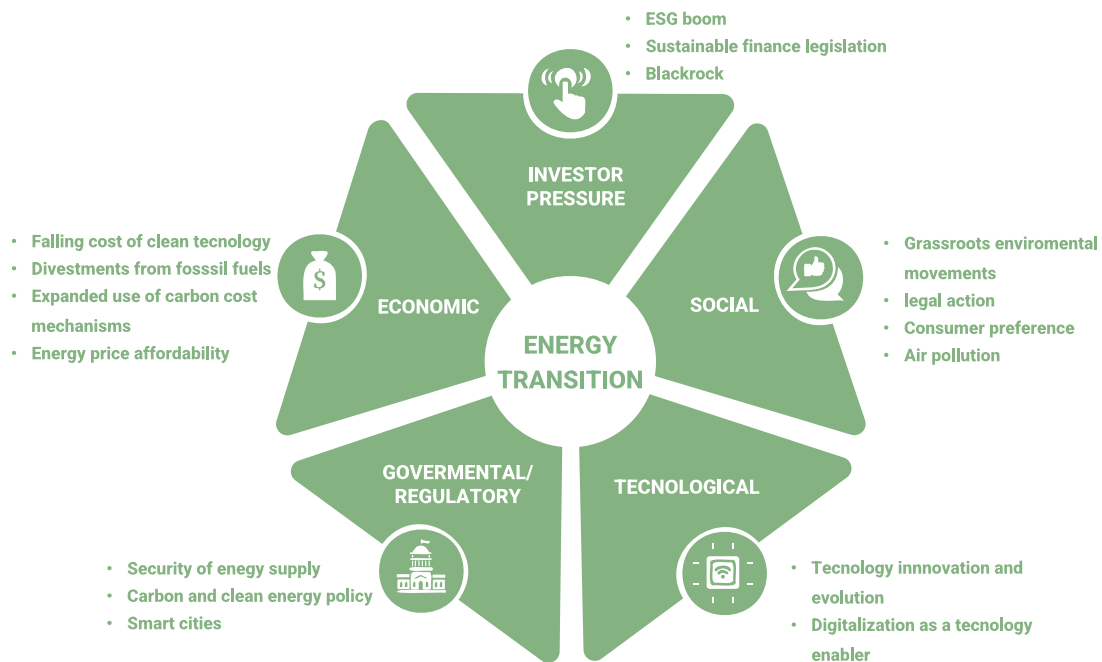
A transição para uma economia descarbonizada é um objetivo global importante e é fundamental para criar um futuro mais sustentável e resiliente. O *Road to 2050*, com ênfase na descarbonização, visa uma série de áreas de ação que podem ser aplicadas ao acima mencionado. Contudo, há outras áreas que também devem ser levadas em conta, uma vez que a gestão do setor, não se pode fazer sem que haja uma forte componente de comunicação com a comunidade onde a indústria se insere. São estas:

- **Conscientização pública:** educação, informação e sensibilização são cruciais para obter o apoio generalizado à descarbonização e para promover mudanças no comportamento;
- **I&D+i:** investimentos contínuos em pesquisa e desenvolvimento são necessários para encontrar soluções mais eficazes e económicas para a descarbonização. Podemos desta forma ter uma maior articulação entre a indústria e a academia;
- **Monitorizar e reportar:** introduzir com maior fiabilidade e transparência indicadores e dados não financeiros das empresas, que permitam acompanhar, monitorizar e melhorar continuamente a sua pegada, bem como definir os seus objetivos e as ações e investimentos a curto, médio e longo prazo. Medir o impacto destas ações e comunicá-las, não só incute uma orientação estratégica às empresas, como otimiza os seus resultados globais, criando efeito de contágio e melhorando, por isso, globalmente este setor industrial.

A transição para um futuro descarbonizado até 2050 é desafiadora, principalmente numa indústria considerada, em parte, hard to abate, mas é um passo fundamental para atingir as metas globais e reduzir os impactos das alterações climáticas, onde todos somos chamados a contribuir.

Sabendo que a sociedade não pode ficar sem os materiais e meios para a sua sobrevivência diária, apenas uma cooperação e colaboração global e um compromisso com metas ambiciosas de redução de emissões podem ajudar a alcançar o objetivo de um desenvolvimento sustentável. Tal como os cinco P dos ODS (Pessoas, Prosperidade, Paz, Planeta, Parcerias).

**KEY FACTORS ACCELERATING THE DE-CARBONIZED ENERGY TRANSITION**



Source Cowen and Company . LLC

► Figura 2.3. Fatores-chave para uma transição energética na indústria [2].

**O caminho, as tendências e o futuro**

Em conclusão, o fundamental é:

- Primeiro, adotar práticas que sejam mais responsáveis e respeitem a natureza, mimetizando-a, considerando os nove limites da saúde planetária [3]. Para isso, o primeiro passo é simplificar, continuando a educar e a comunicar mais e melhor, no sentido de sabermos fechar o ciclo de todos os materiais, produtos, subprodutos e resíduos;
- Segundo, introduzir num novo modelo de desenvolvimento, universalizando indicadores de desempenho ambiental e usar plataformas de medição desses mesmos indicadores, na área do ambiente e do desenvolvimento sustentável, sejam os *ESG (Environmental, Social, and Governance)*, *KPI (Key Performance Indicator)* e categorias do *CSRD* ou a *Pegada Carbónica*, de forma a associar a gestão económica e financeira à gestão ambiental, e assim atingirmos a tão desejada neutralidade climática e cumprindo a agenda de descarbonização;

- Terceiro, assumir ao nível corporativo a responsabilidade comum de ir além da mera compensação de danos e emissões, e contribuir para a remoção positiva de emissões de GEE, valorizando o capital natural, investindo na conservação e no restauro da natureza e biodiversidade, de forma que esses investimentos sejam internalizados nas empresas como ativos intangíveis de longo prazo.

Numa nova racionalidade económica, como de resto apontam os recentes relatórios *Draghi [4]* e *Letta [5]*, é necessariamente acompanhada por uma gestão integrada, multidisciplinar e transversal, acompanhada por uma governança mais forte, transparente, multilateral e multinível, com ética e justiça ambiental, porque sem esta a ação coletiva não existe. Só uma visão de restaurar o “recurso comum”, no interesse coletivo, torna possível que todos possam ver os seus interesses individuais satisfeitos, em perfeita harmonia e simbiose. Estamos no momento em que defender os interesses individuais e comuns, segurança e prosperidade para todos, é através da prossecução do restauro e

futura manutenção permanente de um património comum, de forma a assegurar o bom estado de funcionamento do sistema terrestre, e usufruir de um Clima Estável. Sem isso não há sociedade e não há economia.

Hoje deve imperar a cooperação, a solidariedade, a felicidade e o bem-estar. Deixemos para trás as empresas cinzentas, egocêntricas e fechadas, e construamos empresas abertas ao mundo, à tolerância, à partilha, à igualdade e à natureza, onde todos façamos parte de um modelo de **economia regenerativa, circular e de baixo carbono**.

Cada vez mais, o planeta será não só aquilo que os Estados quiserem, mas essencialmente aquilo que as cidades e as empresas fizerem e, com isso, o que os cidadãos queiram ser. A sustentabilidade está no equilíbrio entre a Humanidade e o Planeta, na estabilidade dos sistemas e na paz entre os povos.

## 2.2. Clima, Carbono e Energia: Enquadramento Regulamentar Europeu e Nacional da Descarbonização

As alterações climáticas representam uma das mais graves ameaças globais que a humanidade enfrenta. São causadas principalmente pela emissão de gases de efeito estufa, como dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), metano e óxido nitroso, gases fluoreados (e outros) com origem antropogénica, como a queima de combustíveis fósseis para mobilidade, produção de energia elétrica e em processos industriais [6].

Em 2015, na 21<sup>a</sup> Conferência das Partes (COP21) da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (UNFCCC<sup>2</sup>), foi assinado o Acordo de Paris [7] por 195 países signatários que assumiram o compromisso de manter o aumento da temperatura global abaixo dos 2°C e de reunir esforços para limitar o aumento a 1,5°C acima dos níveis pré-industriais. Para alcançar essas metas, os países signatários comprometeram-se a contribuir com reduções significativas de emissões. Desde então, houve um crescente compromisso global em responder à irrefutável ameaça das alterações climáticas e suas consequências.

Em 2018, o Relatório Especial do Painel Intergovernamental para as Alterações Climáticas (*IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change*) [8] reportava que:

- as atividades humanas são responsáveis pelo aumento de aproximadamente 1°C na temperatura média global, em relação aos valores pré-industriais, numa gama de temperaturas entre 0,8°C e 1,2°C, sendo expectável que o aquecimento global atinja 1,5°C, entre 2030 e até 2052, caso a taxa de aumento se mantenha;
- O impacto das alterações climáticas para os ecossistemas e para a saúde humana varia com a intensidade e a velocidade do aquecimento, a localização geográfica, os níveis de desenvolvimento e vulnerabilidade das regiões, e a implementação de medidas de adaptação e mitigação climática. Alguns impactos podem ser duradouros ou irreversíveis, como a perda de alguns ecossistemas.

Face a este cenário, a União Europeia (UE) tem assumido um papel de liderança na transição ecológica, implementando políticas e instrumentos legais destinados a reduzir as emissões de GEE, promover as energias limpas e alcançar a neutralidade carbónica.

1 Conference Of Parties

2 United Nations Framework Convention on Climate Change

3 Corporate Sustainability Reporting Directive

4 Environmental, Social and Governance

## Contexto europeu

Em 2019, é lançado pela União Europeia o Pacto Ecológico Europeu (European Green Deal) [9] como a estratégia da União Europeia (UE) para tornar a sua economia sustentável e resiliente, em resposta à crise climática. O pacto visa alinhar o crescimento económico com a preservação ambiental, a promoção de um futuro de baixo carbono, a economia circular e a justiça social, com o principal objetivo de atingir a neutralidade carbónica até 2050, tornando a União Europeia como o primeiro bloco de países do mundo a atingir emissões líquidas zero de gases com efeito de estufa.

Em 2021, sob o Pacto Ecológico Europeu é lançada a **Lei Europeia do Clima** [10], que transpõe para a legislação o objetivo estabelecido pelo Pacto Ecológico Europeu para que a economia e a sociedade europeias atinjam a neutralidade carbónica até 2050. Para a concretização dos objetivos propostos na Lei Europeia do Clima é lançado, ainda em 2021 o pacote legislativo **Fit for 55** [11], com o objetivo de garantir que a UE consiga reduzir as suas emissões líquidas de gases com efeito de estufa em pelo menos 55% até 2030, em comparação com os níveis de 1990. Este pacote prevê esforços distintos para as empresas abrangidas pelo CELE (Comércio Europeu de Licenças de Emissão, EU-ETS na sigla inglesa) e empresas não-CELE; o alargamento do CELE a mais setores da economia, como a criação do CELE 2, que abrange emissões de CO<sub>2</sub> provenientes da queima de combustíveis no transporte rodoviário, edifícios e pequenas indústrias ainda não abrangidas pelo CELE; e a adoção do **Mecanismo de Ajustamento Carbónico Fronteiriço (CBAM - Carbon Border Adjustment Mechanism)** que impõe um custo de carbono sobre determinados bens importados de países cujas normas ambientais são menos exigentes do que as da UE. Paralelamente, o

pacote inclui metas ambiciosas para o aumento da eficiência energética e a promoção de energias renováveis. Para apoiar a transição, a UE disponibiliza fundos e apoios financeiros para ajudar as regiões e os trabalhadores mais afetados pela mudança, promovendo a requalificação e a criação de novos empregos nos setores verdes.

Em 2022, na **Diretiva de Reporte de Sustentabilidade Corporativo (CSRD<sup>3</sup>)** [12], a UE estabelece regras mais rigorosas para a divulgação de informações de sustentabilidade pelas empresas, nomeadamente a obrigatoriedade de reporte das emissões de gases com efeito de estufa e dos seus planos de transição climática, para atingirem a neutralidade carbónica até 2050. O objetivo da diretiva é aumentar a transparência e a consistência na comunicação sobre impactos ambientais, sociais e de governança corporativa (ESG<sup>4</sup>), alinhando-se às metas estabelecidas no Pacto Ecológico Europeu.

Em 2023, é lançado o **Plano Industrial do Pacto Ecológico** [13], que procura complementar os esforços propostos no Pacto Ecológico Europeu, aumentar a competitividade e apoiar a transição rápida da indústria para a neutralidade carbónica, baseando-se em quatro pilares:

- simplificação do quadro regulatório;
- aceleração do investimento e financiamento para a produção de tecnologias mais limpas, com foco, a curto prazo nos programas **REPowerEU** [14], **InvestEU** [15] e **Fundo de Inovação** [16];
- capacitação dos trabalhadores, para assegurar que a transição para a neutralidade carbónica

seja acompanhada pela criação de empregos de qualidade e bem remunerados nas tecnologias limpas;

- cooperação mundial e abertura do comércio para cadeias de abastecimento resilientes.

No âmbito do Plano Industrial do Pacto Ecológico, salientam-se as seguintes iniciativas regulatórias:

- **Regulamento Indústria de Impacto Zero [17]** (*NZIA - Net Zero Industry Act*) que visa aumentar a capacidade de produção de tecnologias que contribuam para a descarbonização. Estabelece como meta para a UE, até 2030, do fabrico de, pelo menos 40% das necessidades anuais de tecnologias de baixo carbono;
- **Regulamento Europeu das Matérias-Primas Críticas (*CRM Act – Critical Raw Materials Act*) [18]** destinada a reforçar o fornecimento de matérias-primas estratégicas da UE, através do aumento do acesso às cadeias de abastecimento, da exploração sustentável e da reciclagem de matérias-primas, com vista à redução da impor-

tação de matérias-primas, garantindo menor dependência a fornecedores externo;

- **Reforma do Mercado da Eletricidade**, concebida para modernizar e integrar o sistema elétrico europeu, com o objetivo de apoiar a descarbonização do setor energético, promovendo uma maior integração das energias renováveis no mercado e a melhoria da interligação entre os Estados-Membros. Além disso, estabelece mecanismos (por exemplo, contratos de longa duração, contratos por diferença, CfD) para garantir a previsibilidade e a estabilidade dos preços da energia, fundamentais para a competitividade industrial.

Em fevereiro de 2025, é lançado pela União Europeia o **Pacto da Energia Limpa (*Clean Industrial Deal*) [19]** com o objetivo de reforçar a competitividade e a descarbonização da indústria europeia, especialmente nos setores intensivos em energia, alinhando a política industrial com os objetivos climáticos da UE, promovendo a inovação verde, a economia circular e a segurança energética.

## Contexto nacional

Como signatário do Acordo de Paris, Portugal comprometeu-se internacionalmente a reduzir as suas emissões de gases com efeito de estufa (GEE) para atingir a neutralidade carbónica até 2050. Enquanto Estado-Membro da UE, Portugal aplica os princípios e as metas do Acordo de Paris através das políticas definidas no Pacto Ecológico Europeu, que estabelece metas mais ambiciosas e disponibiliza mecanismos financeiros para apoiar os Estados-Membros na Transição Climática.

Neste contexto, é lançado em 2019, o **Roteiro para a Neutralidade Carbónica 2050 (RNC2050) [20]**, plano estratégico nacional, que identifica os principais vetores da descarbonização, define as opções de políticas e medidas a adotar, e estabelece a trajetória de redução de emissões necessárias para atingir esse objetivo, considerando diferentes cenários de desenvolvimento socioeconómico e os diferentes setores da economia. O RNC2050 estabelece que a neutralidade carbónica até 2050 é económica e

tecnologicamente viável, assente numa redução de emissões entre 85% e 90% até 2050, face a 2005, e compensação das restantes emissões através do sumidouro proporcionado pelo uso do solo e florestas. A trajetória para a neutralidade permite antecipar reduções de emissões de gases com efeitos de estufa entre -45% e -55% em 2030 e entre -65% e -75% em 2040, em relação a 2005.

Alcançar a neutralidade carbónica até 2050 implica, a par do reforço da capacidade de sequestro de carbono pelas florestas e por outros usos do solo, a descarbonização total do sistema electroprodutor e da mobilidade urbana. Implica igualmente mudanças profundas na forma como utilizamos a energia e os recursos, apostando numa economia que se sustenta em recursos renováveis, utiliza os recursos de forma eficiente e assenta em modelos de economia circular, valorizando o território e promovendo a coesão territorial.

Alinhado com o RNC2050, é aprovado em 2020, o **Plano Nacional para a Energia e Clima (PNEC2030)** [21], que constitui o principal instrumento de política energética e climática para a década de 2021-2030. Estabelece metas relativamente à redução de emissões de gases com efeito de estufa, incorporação de energias renováveis, eficiência energética, segurança de abastecimento, mercado interno de energia e investigação, inovação e competitividade, assim como as principais linhas de atuação para o cumprimento das metas propostas. É um instrumento obrigatório para os Estados-Membros da UE, no âmbito das obrigações estabelecidas pelo Regulamento da Governação da União da Energia e da Ação Climática, sendo revisto periodicamente para garantir que as políticas energéticas e climáticas estejam com os compromissos nacionais e internacionais, e que reflitam os avanços tecnológicos, as mudanças nos contextos socioeconómicos e ambientais, e/ou novas metas estabelecidas

pela União Europeia. Na sua primeira versão, o PNEC2030 estabeleceu como metas até 2030:

- redução das emissões de CO<sub>2</sub> entre 45–55% em relação aos níveis de 2005;
- 47% no consumo final bruto de energia renovável;
- 20% de consumo de energias renováveis nos transportes;
- 80% de produção de energia elétrica renovável;
- redução em 35% no consumo em energia primária;
- garantia de 15% de interligações elétricas com os outros Estados-Membros da UE.

Ainda em 2020, com o objetivo de diversificar a matriz energética e acelerar a transição energética em Portugal é aprovada a **Estratégia Nacional para o Hidrogénio** [22] (EN-H2), que visa impulsionar a introdução gradual do hidrogénio verde como um pilar sustentável, integrado numa estratégia mais abrangente de transição para uma economia de baixo carbono. Nesse sentido, promove a produção, utilização e exportação de hidrogénio verde, com vista à criação das condições necessárias para a existência de uma verdadeira economia de baixo carbono em Portugal [23]. O objetivo é garantir, a longo prazo, a descarbonização de toda a rede de gás e das centrais térmicas, e contribuir significativamente para a descarbonização da indústria e dos transportes. Para 2030, a EN-H2 estabelece como metas a instalação de 2 a 2,5 GW de capacidade em eletrolisadores, a criação de 50 a 100 postos de abastecimento de hidrogénio e a incorporação de hidrogénio verde em diversos setores, incluindo a indústria e os transportes.

Em 2021, é promulgada a **Lei de Bases do Clima** [24], marco legislativo que estabelece os princípios, metas e instrumentos para o combate às alterações climáticas e a promoção da transição energética do país, e introduz a possibilidade de antecipação da meta de neutralidade climática para 2045.

Em 2022, Portugal transpõe a Diretiva Europeia sobre as Energias Renováveis, RED II (Decreto-Lei no 84/2022 [25]), que reforça as metas de incorporação dos biocombustíveis e introduz critérios de sustentabilidade para a produção de biocombustíveis e utilização de biomassa florestal.

Em 2024, é aprovada a atualização do PNEC2030 [26], com vista a estabelecer metas mais ambiciosas para a redução de emissões de GEE, através do aumento da quota de energias renováveis, eletrificação da economia, implementação de medidas de promoção da eficiência energética e incorporação de gases renováveis, nomeadamente:

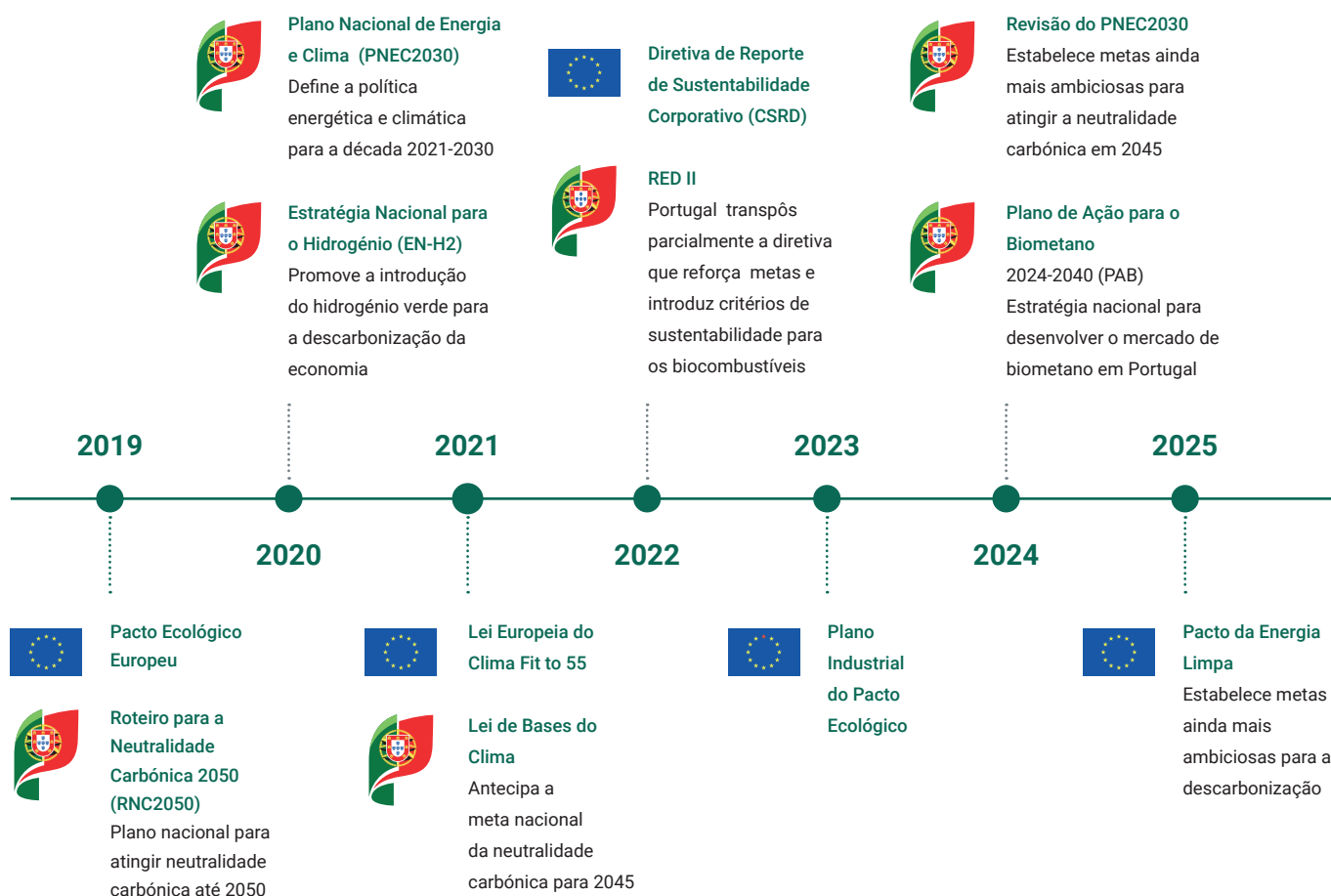
- a redução mínima das emissões de CO<sub>2</sub> de 55% em relação aos níveis de 2005, até 2030;
- o aumento para 51% na quota de energias renováveis no consumo final bruto de energia até 2030;
- aumento para 29% no consumo de energias renováveis nos transportes;
- redução em 16.711 ktep e 14.371 ktep no consumo em energia primária e final, respetivamente.

Esta revisão do PNEC2030 confirma o posicionamento de Portugal em acelerar a transição climática e energética, traçando uma trajetória clara para alcançar a neutralidade climática em 2045 para atingir a neutralidade climática até 2045.

Também em 2024 é aprovado o **Plano de Ação para o Biometano 2024-2040** [27] (PAB) que visa estabelecer uma estratégia nacional para desenvolver o mercado de biometano em Portugal, promovendo a descarbonização, a redução das importações de gás natural e o aproveitamento sustentável dos recursos endógenos.

Ainda no final de 2024, é criada a **Agência para o Clima (ApC)** [28], dedicada exclusivamente às questões climáticas, e com a missão de liderar a transição de Portugal para atingir a neutralidade carbónica até 2045.

A articulação entre os regulamentos europeus e as políticas nacionais é essencial para garantir uma abordagem coesa e eficaz rumo à descarbonização. O alinhamento entre esses dois níveis regulatórios proporciona diretrizes claras e facilita a implementação de estratégias que não só reduzem o impacto ambiental, como promovem o desenvolvimento sustentável e a competitividade no mercado global.



► Figura 2.4. Linha do tempo das políticas de descarbonização a nível europeu e nacional.

## Referências

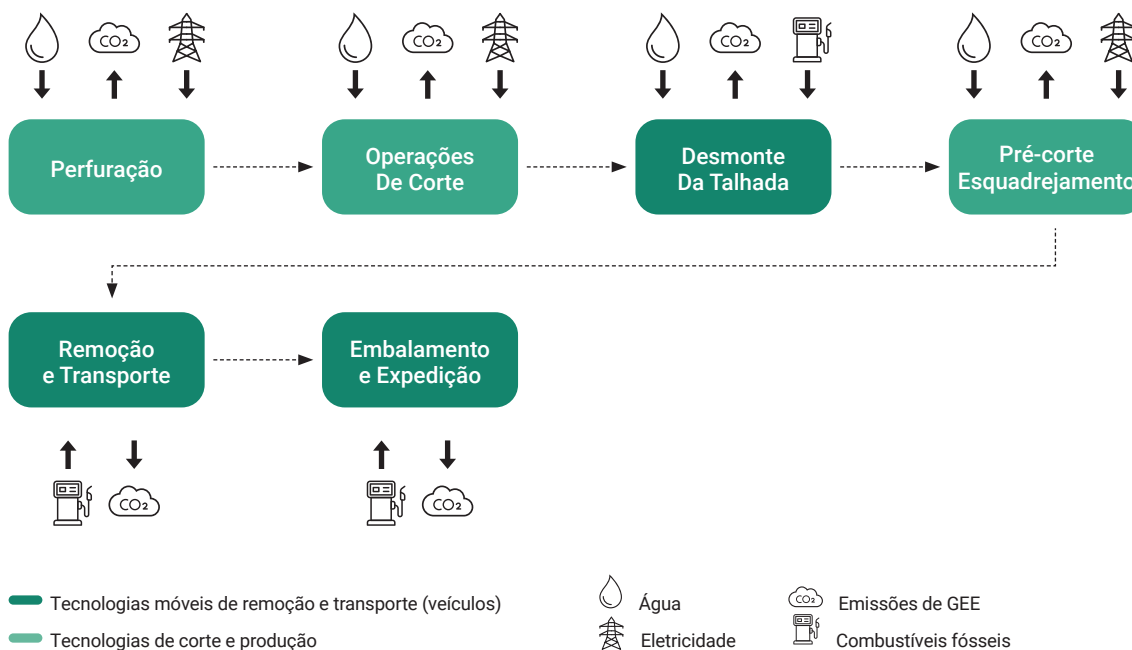
- [1]. One Earth, “Below 1.5 °C: A breakthrough roadmap to solve the climate crisis.” One Earth, 2022. [Online]. Disponível em: <https://www.oneearth.org/below-1-5-c-a-breakthrough-roadmap-to-solve-the-climate-crisis/>
- [2]. Cowen, “Energy transition for a sustainable future.” Cowen Insights. [Online]. Disponível em: <https://www.cowen.com/insights/energy-transition-for-a-sustainable-future/>
- [3]. Stockholm Resilience Centre, “Planetary boundaries,” Stockholm Resilience Centre. [Online]. Disponível em: <https://www.stockholmresilience.org/research/planetary-boundaries.html>
- [4]. European Commission, “EU-competitiveness: Looking ahead.” European Commission. [Online]. Disponível em: [https://commission.europa.eu/topics/strengthening-european-competitiveness/eu-competitiveness-looking-ahead\\_en#paragraph\\_47059](https://commission.europa.eu/topics/strengthening-european-competitiveness/eu-competitiveness-looking-ahead_en#paragraph_47059)
- [5]. E. Letta, “Much more than a Market,” European Council, Apr. 2024. [Online]. Disponível em: <https://www.consilium.europa.eu/media/ny3j24sm/much-more-than-a-market-report-by-enrico-letta.pdf>
- [6]. Lackner, M., Chen, WY., Suzuki, T. (2012). Introduction to ClimateChange Mitigation. In: Chen, WY., Seiner, J., Suzuki, T., Lackner, M.(eds) Handbook of Climate Change Mitigation. Springer, New York. [https://doi.org/10.1007/978-1-4419-7991-9\\_1](https://doi.org/10.1007/978-1-4419-7991-9_1)
- [7]. UNFCCC, Paris Agreement, United Nations Framework Convention on Climate Change, 2015. Disponível em: [https://unfccc.int/sites/default/files/english\\_paris\\_agreement.pdf](https://unfccc.int/sites/default/files/english_paris_agreement.pdf)
- [8]. IPCC, Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways [V. Masson Delmotte, P. Zhai, H.-O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P. R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma Okia, C. Péan, R. Pidcock, S. Connors, J. B. R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M. I. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor, T. Waterfield (eds.)]. Geneva: IPCC, 2018. Disponível em: [https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/2/2022/06/SR15\\_Full\\_Report\\_HR.pdf](https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/2/2022/06/SR15_Full_Report_HR.pdf)
- [9]. European Commission, European Green Deal – Estratégia e prioridades 2019 2024, Comissão Europeia. Disponível em: [https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal\\_pt?prefLang=pt](https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal_pt?prefLang=pt)
- [10]. Parlamento Europeu e Conselho da União Europeia, Regulamento (UE) 2021/1119 — que cria o regime para alcançar a neutralidade climática e altera os Regulamentos (CE) n.º 401/2009 e (UE) 2018/1999, Jornal Oficial da União Europeia, L 243, 30 Jun. 2021. Disponível em: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PT/TXT/PDF/?uri=CELEX:32021R1119>
- [11]. European Commission, Fit for 55: Delivering on the proposals – Delivering the European Green Deal, 2021. Disponível em: [https://commission.europa.eu/topics/climate-action/delivering-european-green-deal/fit-55-delivering-proposals\\_en](https://commission.europa.eu/topics/climate-action/delivering-european-green-deal/fit-55-delivering-proposals_en)
- [12]. Parlamento Europeu e Conselho da União Europeia, Diretiva (UE) 2022/2464, Jornal Oficial da União Europeia, L 322, 16 Dez. 2022. Disponível em: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PT/TXT/PDF/?uri=CELEX:32022L2464>
- [13]. European Commission, The Green Deal Industrial Plan: putting Europe’s net zero industry in the lead, 1 Feb. 2023. Disponível em: [https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/ip\\_23\\_510](https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/ip_23_510)
- [14]. European Commission, REPowerEU: Affordable, Secure and Sustainable Energy for Europe, 2022. Disponível em: [https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal/repower-eu-affordable-secure-and-sustainable-energy-europe\\_en](https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal/repower-eu-affordable-secure-and-sustainable-energy-europe_en)
- [15]. InvestEU, “InvestEU programme”, European Commission. Disponível em: [https://investeu.europa.eu/index\\_en](https://investeu.europa.eu/index_en)
- [16]. European Commission, Innovation Fund – EU funding for climate action, 2025. Disponível em: [https://climate.ec.europa.eu/eu-action/eu-funding-climate-action/innovation-fund\\_en](https://climate.ec.europa.eu/eu-action/eu-funding-climate-action/innovation-fund_en)
- [17]. Comissão Europeia, Proposta de Regulamento do Parlamento Europeu e do Conselho que estabelece um

- quadro de medidas para reforçar o ecossistema europeu de fabrico de produtos com tecnologia de impacto zero (Net Zero Industry Act), COM(2023) 161 final, Bruxelas, 16 Mar. 2023. Disponível em: [https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:6448c360-c4dd-11ed-a05c-01aa75ed71a1.0019.02/DOC\\_1&format=PDF](https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:6448c360-c4dd-11ed-a05c-01aa75ed71a1.0019.02/DOC_1&format=PDF)
- [18]. Parlamento Europeu e Conselho da União Europeia, Regulamento (UE) 2024/1252 do Parlamento Europeu e do Conselho, de 11 de abril de 2024, que estabelece um regime para garantir um aprovisionamento seguro e sustentável de matérias-primas críticas e que altera os Regulamentos (UE) 2018/1724 e 2019/1020, Jornal Oficial da União Europeia, OJ L\_20240125, 11 Abr. 2024. Disponível em: [https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PT/TXT/PDF/?uri=OJ:L\\_202401252](https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PT/TXT/PDF/?uri=OJ:L_202401252)
- [19]. Comissão Europeia, Clean Industrial Deal – Plano para competitividade e descarbonização da UE, 26 Fev. 2025. Disponível em: [https://commission.europa.eu/topics/eu-competitiveness/clean-industrial-deal\\_pt](https://commission.europa.eu/topics/eu-competitiveness/clean-industrial-deal_pt)
- [20]. UNFCCC, Roteiro para a Neutralidade Carbónica 2050 (RNC2050), 2019. Disponível em: [https://unfccc.int/sites/default/files/resource/RNC2050\\_PT-22-09-2019.pdf~](https://unfccc.int/sites/default/files/resource/RNC2050_PT-22-09-2019.pdf~)
- [21]. República Portuguesa, Resolução do Conselho de Ministros n.º 53/2020, de 10 de julho, Diário da República, 1.ª série, n.º 133, 2020. Disponível em: <https://files.diariodarepublica.pt/1s/2020/07/13300/0000200158.pdf>
- [22]. República Portuguesa, Resolução do Conselho de Ministros n.º 63/2020, de 14 de agosto, Diário da República, 1.ª Série, n.º 158, 2020. Disponível em: <https://diariodarepublica.pt/dr/detalhe/resolucao-conselho-ministros/63-2020-140346286>
- [23]. Direção Geral de Energia e Geologia, Estratégia Nacional para o Hidrogénio (EN H2), DGEG. Disponível em: <https://www.dgeg.gov.pt/pt/areas-transversais/relacoes-institucionais-e-de-mercado/politica-energetica/estrategia-nacional-para-o-hidrogenio-en-h2/> [dgeg.gov.pt](https://www.dgeg.gov.pt)
- [24]. República Portuguesa, Lei n.º 98/2021, de 31 de dezembro – Lei de Bases do Clima, Diário da República, 1.ª série, n.º 253, 2021. [Online]. Disponível em: <https://diariodarepublica.pt/dr/detalhe/lei/98-2021-176907481>
- [25]. República Portuguesa, Decreto-Lei n.º 84/2022, de 9 de dezembro, Diário da República, 1.ª série, n.º 236, 2022. [Online]. Disponível em: <https://files.diariodarepublica.pt/1s/2022/12/23600/0000800045.pdf>
- [26]. República Portuguesa, Resolução do Conselho de Ministros n.º 149/2024, de 30 de outubro, Diário da República, 1.ª série, n.º 211, 2024. [Online]. Disponível em: <https://diariodarepublica.pt/dr/detalhe/resolucao-conselho-ministros/149-2024-893982647>
- [27]. República Portuguesa, Resolução do Conselho de Ministros n.º 41/2024, Diário da República, 1.ª série, n.º 54, 2024. [Online]. Disponível em: <https://diariodarepublica.pt/dr/detalhe/resolucao-conselho-ministros/149-2024-893982647>
- [28]. República Portuguesa, Decreto-Lei n.º 122/2024, de 31 de dezembro, Diário da República, 1.ª série, n.º 253, 2024. [Online]. Disponível em: <https://files.diariodarepublica.pt/1s/2024/12/25300/0003500076.pdf>

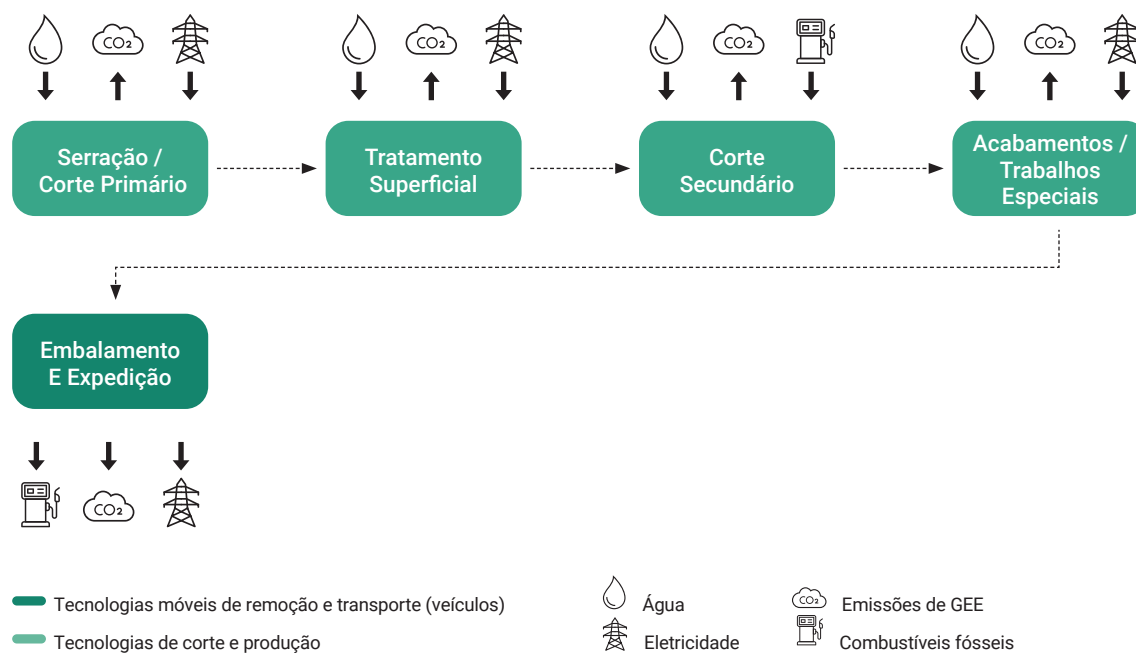
### 2.3. Principais Vetores de Descarbonização no Setor da Pedra Natural

A cada empresa de extração do setor da pedra natural, de extração ou transformação, está associado um ciclo produtivo que depende da matéria-prima extraída ou transformada e do produto final. De uma forma geral, o ciclo produtivo integra operações unitárias semelhantes, que representam as principais fontes de emissão de GEE (Figura 2.5 e Figura 2.6).

As emissões de GEE resultam principalmente do uso de combustíveis fósseis, usada principalmente no transporte e movimentação de pedra, e eletricidade não renovável, mas operações de corte e transformação da pedra.



► Figura 2.5. Principais fontes de emissão de GEE no ciclo produtivo de extração da pedra natural (Fonte: ASSIMAGRA – Relatório de Consumo Energético da Indústria Extrativa e Transformadora).

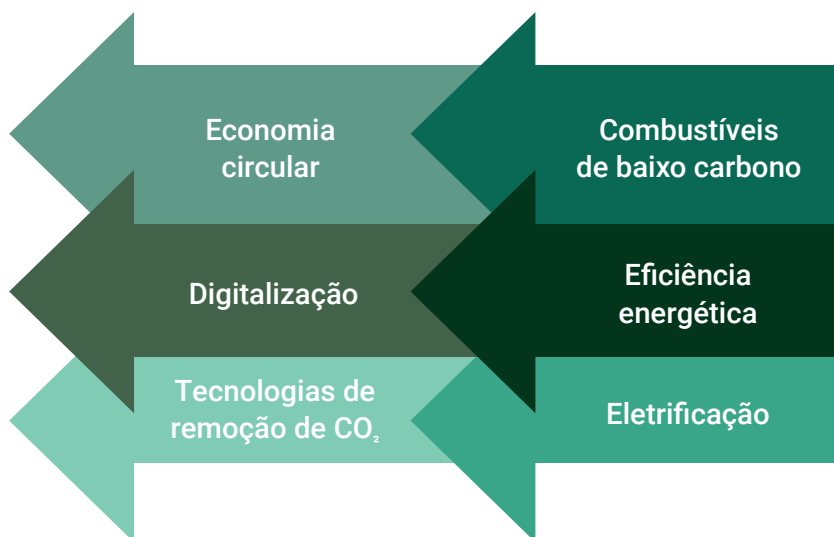


► Figura 2.6. Principais fontes de emissão de GEE no ciclo produtivo da transformação da pedra natural (Fonte: ASSIMAGRA – Relatório de Consumo Energético da Indústria Extrativa e Transformadora).

A redução das emissões de gases com efeito de estufa (GEE) no setor da pedra natural requer uma abordagem abrangente, que combine diversas estratégias e tecnologias.

O caminho para a descarbonização representa um enorme desafio para o setor, exigindo uma transformação profunda nos seus processos produtivos e logísticos. Este percurso implicará a adoção progressiva de tecnologias e vetores de descarbonização, incluindo, a substituição de combustíveis fósseis por combustíveis de baixo carbono, a eletri-

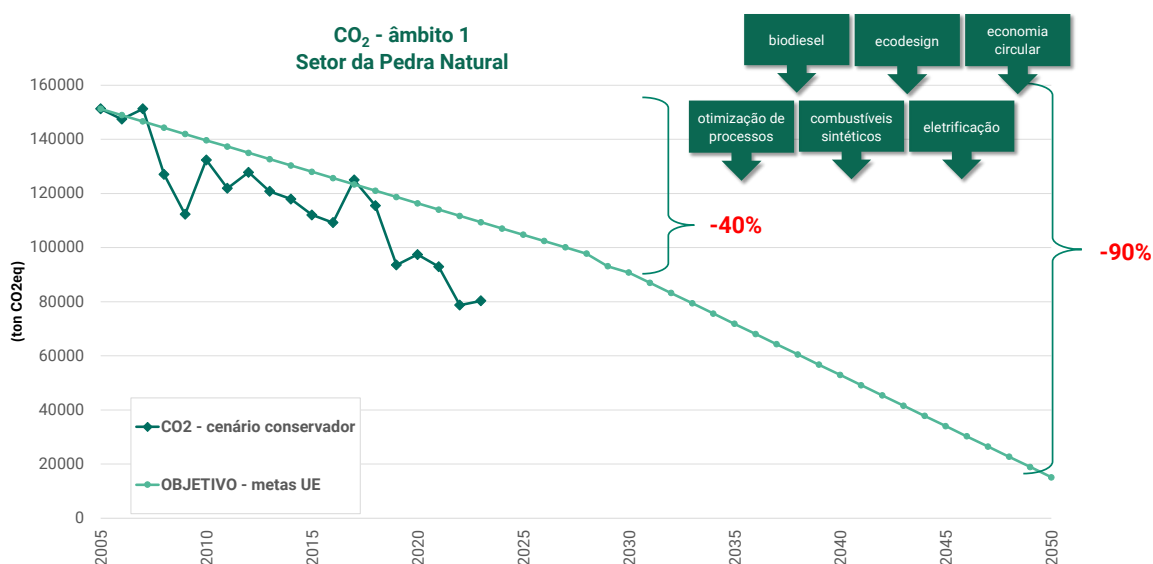
ficação dos equipamentos, a intensificação de práticas de economia circular, como a reutilização de resíduos e a recirculação de água, a otimização dos processos, e a adoção de tecnologias de remoção de carbono se for tecnicamente viável. A transição para um modelo mais sustentável exigirá não apenas investimento tecnológico, mas também capacitação técnica, apoio regulatório e colaboração em toda a cadeia de valor.



► Figura 2.7. Principais vetores de descarbonização.

Apesar de o setor da pedra natural não ser dos mais relevantes em termos absolutos de emissões de CO<sub>2</sub> em Portugal, a Figura 2.8 evidencia o esforço

significativo que será necessário para atingir a neutralidade carbónica até 2050.



► Figura 2.8. Evolução das emissões de CO<sub>2</sub> no setor da pedra natural de 2005 a 2024 e indicação das necessidades de descarbonização face às exigências europeias para 2050 (Fonte: M. Almeida, P. Frade, 2024).





# 03.

## Evolução Prevista para o Setor

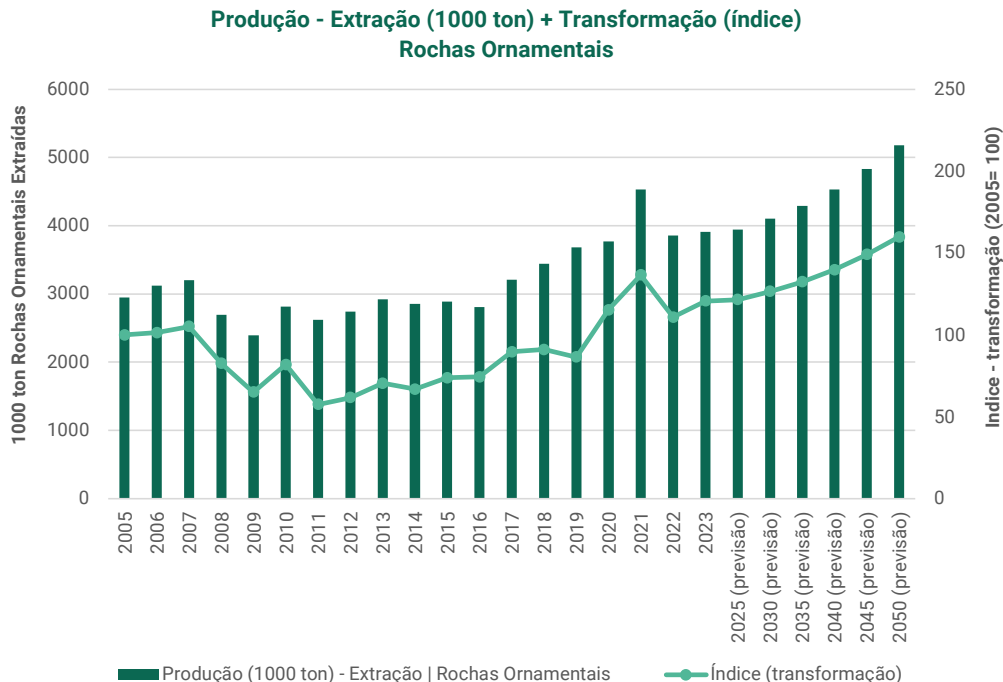


## 3. Evolução Prevista para o Setor

### 3.1. Produção

O setor da pedra natural em Portugal tem registado um forte crescimento desde 2005, tanto em volume de produção extraído como, sobretudo, em capacidade de transformação. As previsões até 2050 apontam para a continuação desta trajetória, alinhando com as previsões do PIB, com a produção a ultrapassar 5 milhões de toneladas e o índice de transformação a crescer de forma ainda mais expressiva face ao ano de referência de 2005 (ver figura seguinte). Esta evolução confirma a transição de um modelo assente na extração bruta para uma indústria focada em produtos acabados de maior valor acrescentado, reforçando a competitividade internacional e criando oportunidades para a sustentabilidade e descarbonização do setor.

A leitura conjunta das duas curvas mostra um setor em expansão quantitativa e qualitativa: cresce em volume extraído, mas sobretudo em capacidade transformadora. Este reforço da transformação é fundamental para consolidar a posição de Portugal como fornecedor de produtos acabados de alto valor no mercado global, ao mesmo tempo que cria condições para maior diferenciação, maior retorno económico e oportunidades de integração de estratégias de sustentabilidade e descarbonização no processo industrial.

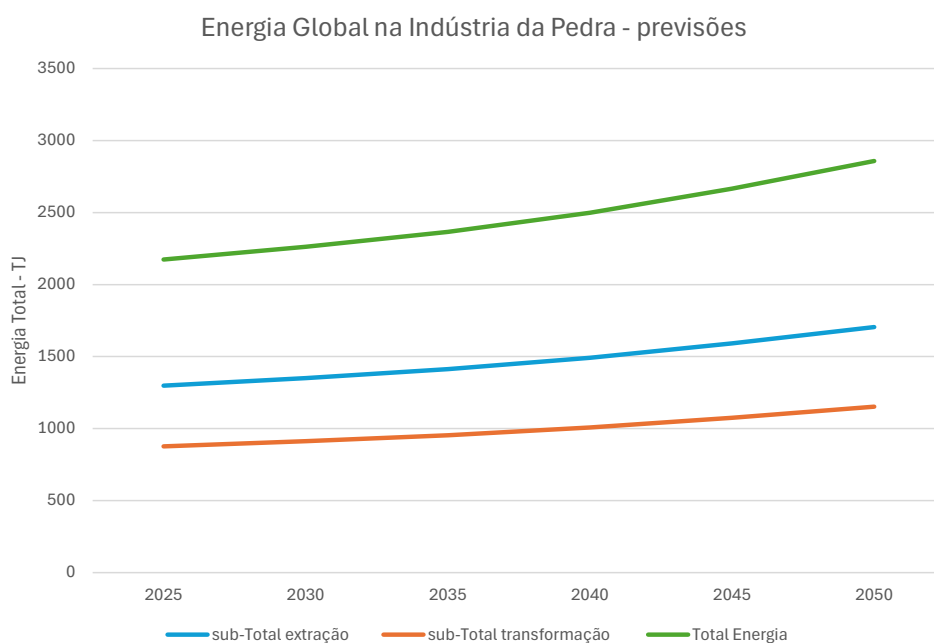


► Figura 3.1. Produção-extração (1000 toneladas) e índice de produção de pedra transformada (2005=100) - previsões (Fonte: CTCV, Assimagra, PNEC2030, RNC2050).

## 3.2. Consumos Energéticos

A análise das previsões de consumo energético (eletricidade e outros combustíveis) no setor da pedra natural até 2050 mostra que a etapa da extração continuará a representar a principal parcela do consumo total, num cenário *Business as Usual*. Este resultado está associado ao uso intensivo de equipamentos pesados movidos a gasóleo, como escavadoras, *dumpers* e perfuradoras, que apresentam uma elevada intensidade energética. Assim, a extração exigirá soluções tecnológicas robustas para substituir os combustíveis fósseis utilizados, como biodiesel, HVO, biocombustíveis avançados, eletrificação parcial e, no futuro, hidrogénio verde.

Por outro lado, a transformação da pedra, embora com um peso energético inferior, regista uma tendência de crescimento contínuo ao longo das próximas décadas. Este aumento reflete a maior capacidade instalada e o acréscimo de valor acrescentado através do corte, serragem, polimento da pedra, entre outros. Apesar de mais dependente de eletricidade do que de combustíveis fósseis, o crescimento da transformação exigirá também medidas de eficiência energética, bem como a integração de eletricidade de origem renovável e práticas de economia circular para reduzir a pegada carbónica.



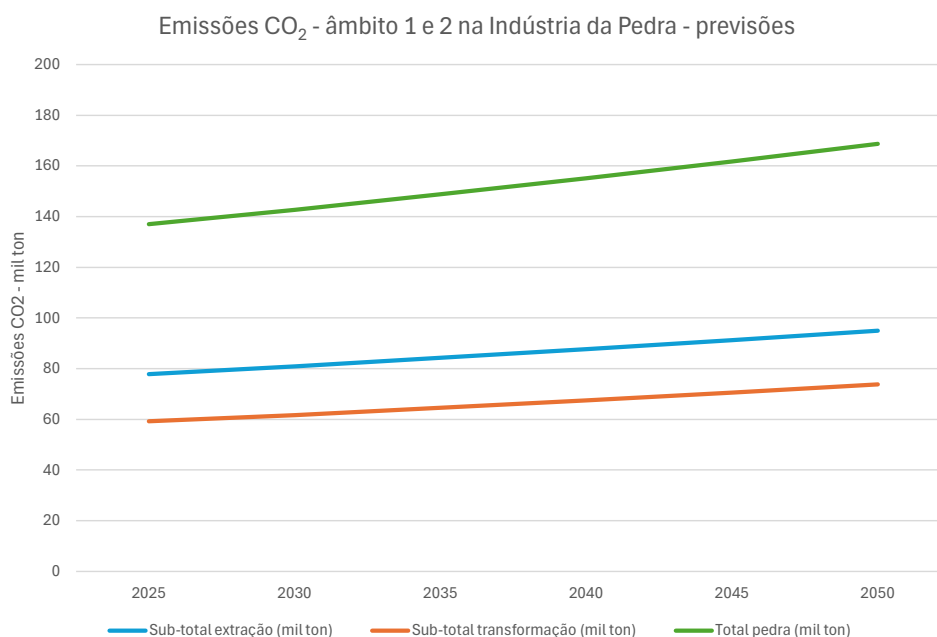
► Figura 3.2. Projeções de consumo energético de 2025 a 2050 – Energia total (eletricidade e outros combustíveis) (Fonte: CTCV, ASSIMAGRA, PNEC2030, RNC2050).



### 3.3. Emissões GEE

Entre 2025 e 2050, num cenário *Business as Usual*, a trajetória das emissões de CO<sub>2</sub> do setor da pedra natural (cenário maximizante e incluindo o âmbito 1 e 2) acompanha, em grande medida, a evolução do consumo energético. Nos primeiros anos, observa-se uma estabilização ou ligeira subida das emissões absolutas, refletindo a dependência ainda significativa do gásóleo nas operações de extração e a de eletricidade (em menor escala). Já na transformação a energia tem o maior contributo para as emissões de CO<sub>2</sub>.

A análise das previsões de emissões de CO<sub>2</sub> no setor da pedra natural até 2050 mostra que a extração continuará a representar a principal parcela, num cenário *Business as Usual*. Este resultado está associado ao uso intensivo de equipamentos pesados movidos a gásóleo, como escavadoras, *dumpers* e perfuradoras.



► Figura 3.3. Projeções de 2025 a 2050 – Emissões totais (âmbito 1 e âmbito 2) (Fonte: CTCV, ASSIMAGRA).





# 04.

Principais  
Tecnologias,  
Técnicas e Medidas  
de Descarbonização  
Disponíveis a Curto,  
Médio e Longo Prazo,  
até 2050



## 4. Principais Tecnologias, Técnicas e Medidas de Descarbonização Disponíveis a Curto, Médio e Longo Prazo, até 2050

### 4.1. Eficiência Energética

#### 4.1.1. O papel dos sistemas de monitorização na eficiência energética

Rui Queiroga

Account Executive da Cleanwatts

A eficiência energética tornou-se um dos pilares fundamentais para a sustentabilidade das organizações, indústrias e lares. O conceito consiste em utilizar menos energia para realizar as mesmas tarefas ou atingir os mesmos resultados, mantendo o nível de conforto, qualidade e operação. Perante o aumento dos custos operacionais e da cres-

cente preocupação com o impacto ambiental, a implementação de sistemas de monitorização do consumo de energia ganha destaque como estratégia essencial para garantir competitividade, reduzir os custos, estar em conformidade com a regulamentação em vigor e cumprir com as metas de descarbonização.

#### Importância da Monitorização Energética

A monitorização contínua do consumo energético permite que os gestores tenham uma visão detalhada e em tempo real de como a energia está a ser utilizada. Isso vai muito além da simples análise das faturas mensais, pois possibilita identificar padrões de consumo, picos de procura e áreas de desperdício que, de outra forma, passariam despercebidos. Tudo isto, em diferentes vertentes energéticas – eletricidade, gás, vapor, águas, ... - e desagregado por áreas de consumo dentro de cada instalação ou em várias instalações.

A energia elétrica é um dos maiores custos operacionais em indústrias e empresas de todas as dimensões. Por isso, a capacidade de identificar ineficiências e implementar medidas corretivas rapidamente é fundamental para a redução de custos e o aumento da eficiência operacional. Além disso, a monitorização energética é requisito fundamental para a certificação ISO 50001, que estabelece padrões internacionais para sistemas de gestão de energia.

## Vantagens dos Sistemas de Monitorização

A adoção de sistemas de monitorização de energia traz uma série de benefícios, entre os quais se destacam:

- **Redução de Custos:** A identificação de práticas de consumo inadequadas e o uso excessivo de equipamentos fora do horário de produção permitem que as empresas implementem medidas corretivas, evitando desperdícios e otimizando o consumo. Isso resulta em uma queda substancial nas contas de energia.
- **Conformidade com Normas e Regulamentações:** A monitorização contínua contribui para o cumprimento de normas técnicas e regulamentações ambientais, como a ISO 50001. Isso não só evita multas e penalidades, mas também reforça a imagem da empresa no mercado.
- **Aumento da Eficiência Operacional:** Com dados precisos sobre o consumo, é possível realizar medições setorizadas, identificar ativos ineficientes e planejar a substituição ou modernização de equipamentos. Isso conduz a uma melhoria contínua do desempenho energético.
- **Alarmes, Prevenção de Avarias, Manutenção Preventiva:** Sistemas de monitorização permitem estabelecer parâmetros de funcionamento normais para cada ponto de consumo. Quando ocorrem desvios, são ativados alertas para as equipas de manutenção, permitindo a correção rápida de anomalias e evitando paragens na produção.
- **Alocação de Custos e Planeamento Financeiro:** A monitorização permite a imputação dos custos energéticos a cada linha de produção ou setor, facilitando a determinação do preço de venda dos produtos e a tomada de decisões estratégicas sobre investimentos e melhorias.
- **Responsabilidade Ambiental:** Ao reduzir o consumo de energia, as empresas também reduzem sua pegada de carbono, contribuindo para a sustentabilidade ambiental.



► Figura 4.1. Representação do ciclo de eficiência energética, um processo iterativo e contínuo.



## Tecnologias e Ferramentas de Monitorização

A evolução tecnológica tem proporcionado soluções cada vez mais avançadas para a monitorização energética. Entre as principais tecnologias utilizadas estão:

- **Sensores IoT:** Sensores e contadores inteligentes instalados em pontos estratégicos da instalação recolhem dados em tempo real sobre o consumo de energia. Esses dados são integrados em plataformas de gestão, permitindo análises detalhadas e a identificação de ineficiências;
- **Inteligência Artificial e Análise de Dados:** A inteligência artificial facilita a análise preditiva, permitindo prever padrões de consumo e otimizar o uso dos recursos energéticos. Algoritmos personalizados podem ainda estimar a vida útil de equipamentos e programar manutenções preventivas;
- **Automação e Controlo Remoto:** Sistemas de automação permitem o controlo centralizado de iluminação, climatização, ventilação e outros sistemas consumidores de energia. É possível programar o ligar/desligar dos equipamentos, ajustar temperaturas e deslocar cargas para horários de tarifa mais baixa, otimizando ainda mais o consumo;
- **Plataformas de Gestão Energética:** Plataformas de *software* dedicadas consolidam os dados recolhidos pelos contadores e dispositivos, fornecendo *dashboards* que facilitam a análise e a tomada de decisões. Essas plataformas também permitem a alocação do custo de energia por setor ou linha de produção, além de fornecer relatórios e indicadores de desempenho;

## Plataforma de Software Cloud Vs On-Premises

É cada vez mais comum encontrarmos plataformas de Monitorização de Energia residentes na *Cloud*, permitindo que o utilizador possa aceder, em qualquer lugar e com um simples browser, ao software e explorar os dados que necessita. Eis algumas das vantagens dos sistemas *Cloud vs On-Premises*;

- Mais ágil, mais económico e mais adaptável a organizações com múltiplas instalações;
- Menor dependência de recursos internos de IT;
- Ideal para serviços com necessidade de atualizações frequentes ou foco em inovação contínua.

Critério	Cloud	On-Premises
Instalação e manutenção	Sem necessidade de infraestrutura IT local; atualizações automáticas	Requer servidores e manutenção local; atualizações manuais
Custos iniciais	Baixo investimento inicial (modelo SaaS/ subscrição)	Elevado custo inicial (licenciamento, hardware, instalação)
Acesso remoto	Total, via browser/app em qualquer lugar	Limitado ou inexistente sem VPN/acesso remoto configurado
Escalabilidade	Fácil de escalar para múltiplos sites ou novos dispositivos	Escalar envolve mais hardware e configurações locais
Tempo de implementação	Rápido (dias)	Mais demorado (semanas/meses)
Atualizações e melhorias	Incluídas automaticamente	Dependem da equipa local e podem implicar interrupções
Cibersegurança e backups	Geridos por fornecedores especializados com padrões elevados	Responsabilidade da equipa local; risco maior se mal gerido
Interoperabilidade	Facilitada com APIs e integrações em cloud	Pode exigir desenvolvimentos customizados e mais complexidade técnica
Suporte técnico	Normalmente incluído no serviço SaaS	Pode exigir contrato à parte ou depender da equipa interna Redundância e continuidade
Redundância e continuidade	Alta disponibilidade garantida pelo fornecedor	Depende da infraestrutura local e planos de contingência próprios

► Figura 4.2. Relação entre critérios de operação e condições relacionadas com alojamento de Sistemas de Monitorização de Energia.



## Conclusão

Os sistemas de monitorização energética são hoje ferramentas indispensáveis para qualquer organização que procure eficiência, redução de custos e sustentabilidade. Ao fornecer dados precisos e em tempo real sobre o consumo de energia, esses sistemas permitem a identificação de ineficiências, a implementação de medidas corretivas e o planeamento estratégico de investimentos. Além disso, contribuem para o cumprimento de normas técnicas e ambientais, reforçando a competitividade e a responsabilidade social das empresas.

A combinação de sensores IoT, inteligência artificial, automação e plataformas de gestão energética está a revolucionar a forma como a energia é gerida, transformando a eficiência energética numa realidade tangível e mensurável para organizações de todas as dimensões. O ciclo da eficiência energética — diagnóstico, planeamento, monitorização e avaliação — garante que as melhorias sejam contínuas e sustentáveis, tornando o investimento em monitorização não apenas uma escolha estratégica, mas uma necessidade para quem deseja destacar-se num mercado cada vez mais exigente e sustentável.

### 4.1.2. Medidas para melhoria da eficiência energética

A modernização tecnológica, o uso de energias renováveis e práticas sustentáveis, juntamente com a monitorização e análise dos indicadores energéticos, contribuem para uma operação mais eficiente, competitiva e ambientalmente responsável. Tecno-

logias modernas, com sistemas de controle automatizado e equipamentos de alta eficiência, podem levar a uma redução significativa do consumo de energia.

#### Eficiência de motores elétricos

Os motores elétricos estão presentes em todos os setores industriais não sendo exceção nas unidades de extração e transformação de pedra natural. O processo de conversão de energia elétrica em energia mecânica envolve perdas, que aumentam quando o motor está sobredimensionado, ou apresenta problemas técnicos. O sobredimensionamento do motor, originado pelo uso de fatores de

segurança excessivos, acarreta várias consequências negativas, tais como, um maior investimento inicial, a redução do fator de potência da instalação e a diminuição do rendimento do motor que se traduz num aumento do consumo de eletricidade.

Neste contexto, a utilização de **Variadores Eletrónicos de Velocidade (VEVs)** apresenta-se como uma

solução eficiente, uma vez que permite ajustar a velocidade do motor às necessidades reais do processo, através do controlo eletrónico da voltagem e da frequência. Deste forma, otimiza-se o funcionamento durante a operação, assim como nas fases de arranque e paragem do motor. Para além de reduzirem significativamente o consumo de energia, os VEVs apresentam vantagens adicionais, nomeadamente, o aumento de vida útil do motor, resultante da redução dos picos de energia e choques mecânicos que causam desgaste; a diminuição das necessidades de manutenção do sistema, devido à sua otimização; o controlo contínuo dos processos; e a possibilidade de melhorar o produto final ao permitir operar nas condições ideais em cada etapa do processo produtivo.

Para máquinas que apresentam um arranque brusco e mantêm um comportamento estável durante o funcionamento, é recomendada a instalação de **arrancadores suaves** (*soft starters*, em inglês). Esses dispositivos eletrónicos são projetados para acelerar e desacelerar motores de indução trifásicos, proporcionando arranques e paragens suaves. Embora não reduzam o consumo de energia do motor, oferecem benefícios como a redução do desgaste

mecânico durante o arranque e a paragem, permitindo economia de energia e aumentando o tempo de vida útil do motor.

Outras medidas de eficiência energética dos motores elétricos incluem:

- utilização de sistemas de transmissão mais eficientes;
- escolha adequada do tipo e dimensão dos motores, de acordo com a sua aplicação;
- substituição de motores obsoletos por modelos mais eficientes;
- paragem dos motores em vazio;
- manutenção e limpeza regulares;
- avaliação da viabilidade de instalar de VEVs e arrancadores suaves.

### Eficiência do ar comprimido em pedreiras

A eficiência do ar comprimido nas operações de pedra natural é essencial para reduzir custos, aumentar a produtividade e minimizar impactos ambientais. A otimização deste recurso assenta em quatro aspetos-chave:

- a) **localização dos equipamentos:** Instalar compressores perto dos pontos de maior consumo reduz perdas de pressão e melhora o desempenho. Uma boa ventilação evita o sobreaquecimento e falhas, garantido a segurança e melhorando a eficiência dos equipamentos.



- b) **deteção e reparação de fugas:** as fugas de ar são uma das principais fontes de desperdício energético. A sua identificação e correção regular prolongam a vida útil dos equipamentos e reduzem os custos de manutenção.
- c) **dimensionamento adequado:** é essencial escolher compressores com pressão e caudal ajustados às necessidades de operação. Compressores sobredimensionados ou subdimensionados afetam a eficiência e aumentam os custos. A utilização de sistemas com controlo variável, como variadores de velocidade, permitem melhorar o desempenho energético.
- d) **formação e capacitação dos técnicos:** operadores bem formados detetam ineficiências e aplicam manutenções preventivas, assegurando um funcionamento otimizado a longo prazo.

## Eficiência em edifícios e infraestruturas

A eficiência energética em edifícios e infraestruturas depende de vários fatores, destacando-se:

- a) o **isolamento térmico:** essencial para reduzir perdas de calor e diminuir a necessidade de aquecimento ou arrefecimento. Pode ser incorporado em novas construções, na cobertura e nas fachadas do edifício, e em edifícios já existentes pode ser aplicado posteriormente, reforçando o desempenho energético e aumentando o conforto interior.
- b) a **iluminação eficiente:** o aproveitamento da luz natural, a pintura de superfícies em tons claros e a instalação de sistemas de controlo automático (como detetores de presença e reguladores de intensidade) ajudam a reduzir o consumo elétrico.
- c) a **tecnologia de iluminação:** a adoção de LEDs e balastros eletrónicos aumenta a eficiência face a tecnologias mais antigas. A manutenção regular e práticas como desligar luzes em zonas não ocupadas evitam desperdício de energia.



## 4.2. Eletrificação

A descarbonização do setor da pedra natural passa, sobretudo, pela substituição de combustíveis fósseis por energias renováveis, como a energia elétrica renovável. A eletrificação do transporte dentro das pedreiras e entre estas e os locais de transformação revela-se uma solução com grande potencial na descarbonização do setor da pedra natural. Esta transição exige o desenvolvimento de novas tecnologias, veículos elétricos, infraestruturas de carregamento e sistemas de gestão energética. A eletrificação representa uma mudança de paradigma que envolve diversos intervenientes

e enfrenta desafios operacionais, como a adaptação da maquinaria existente ou a criação de novos equipamentos elétricos e sistemas de alimentação, incluindo baterias, catenárias e soluções híbridas. Para além do transporte e maquinaria pesada, é igualmente importante considerar a eletrificação dos equipamentos auxiliares. Embora o seu consumo de combustíveis fósseis seja menor, o seu impacto nas emissões de GEE continua a ser significativo e não deve ser negligenciado neste processo de transição energética.

### 4.2.1. Eletrificação do transporte e maquinaria pesada

#### Sistemas elétricos por cabo

Os sistemas de alimentação elétrica por cabo surgem como uma alternativa sustentável e eficiente, permitindo a operação de equipamentos de transporte ligados diretamente à rede elétrica por meio de cabos. Para além da redução das emissões e a maior eficiência energética relativamente aos mo-

tores a gásóleo, têm a possibilidade de operação contínua, uma vez que não exigem reabastecimento. No entanto, exigem uma infraestrutura elétrica robusta e a mobilidade é mais reduzida, dependendo do comprimento dos cabos, o que limita a sua aplicação a percursos fixos e repetitivos.

#### Sistemas de catenária

Já amplamente utilizadas no transporte ferroviário, os sistemas de catenária representam uma solução consolidada para o fornecimento de energia elétrica a veículos em movimento. Estes sistemas baseiam-se na utilização de cabos suspensos que

transmitem energia elétrica diretamente aos veículos, permitindo o abastecimento contínuo de grandes quantidades de energia, sendo particularmente usados para veículos de transporte pesado.

## Baterias

Cada vez mais comuns graças ao avanço tecnológico, as baterias recarregáveis usadas nos veículos de transporte pesado requerem um fornecimento de energia elevado para garantir autonomia suficiente em operações intensivas, o que implica a criação de infraestruturas de carregamento robustas.

O modelo mais difundido continua a ser o dos postos *plug-in*, nos quais os veículos se ligam diretamente a carregadores fixos. Esta solução é relativamente simples e aproveita a maturidade da tecnologia de carregamento rápido já usada em veículos ligeiros. No entanto, apresenta limitações

em termos de tempo de inatividade, uma vez que o carregamento pode durar várias horas, afetando a produtividade em operações que exigem disponibilidade contínua dos equipamentos. Para responder a esse desafio, têm vindo a surgir alternativas complementares. Uma delas é a utilização de **baterias amovíveis**, que podem ser substituídas rapidamente por unidades previamente carregadas. Outra solução inovadora é o **carregamento em movimento** que permite alimentar os veículos enquanto circulam em trajetos definidos, através de tecnologias como carregamento por indução no solo ou linhas elétricas aéreas.

## Sistemas combinados catenária/bateria

A utilização de sistemas combinados catenária/bateria em veículos de transporte permite alternar entre diferentes fontes de energia, utilizando energia das catenárias em rotas com linhas elétricas e energia armazenada em bateria nas rotas sem ca-

tenária, ampliando a autonomia dos veículos para além das rotas com catenárias, e possibilitando, em muitos casos, o recarregamento das baterias durante o movimento.

## Sistemas híbridos gásóleo/elétricos

Os motores híbridos gásóleo/elétricos, usados onde a eletrificação total ainda não é viável, combinam motores a gásóleo e elétricos, permitindo flexibilidade de operação. Operam eletricamente quando existe possibilidade e utilizam motor a gásóleo em sempre que não existam condições para operar com potência elétrica. Dependendo do tipo

de veículo, a energia elétrica pode ser fornecida por catenárias ou baterias, ou ainda pela eletricidade gerada pelo motor a gásóleo.

Atualmente também já se encontram disponíveis soluções híbridas eletricidade/gásóleo ou totalmente elétricas para equipamentos de extração

e transformação da pedra natural, como, perfuradoras, máquinas de fio diamantado para corte de bancadas, ou britadores. Para além de reduzirem significativamente as emissões de GEE locais, es-

tas soluções apresentam, em geral, maior eficiência operacional, e contribuem para a melhoria das condições de trabalho, ao diminuir o ruído e as vibrações.

### Pilhas de combustível

As pilhas de combustível produzem eletricidade através da reação eletroquímica entre o hidrogénio e o oxigénio, gerando vapor de água. Entre as principais vantagens destacam-se a redução de emissões de gases de efeito estufa, a operação silenciosa, maior eficiência energética comparativamente a motores a gasóleo e a possibilidade de

integração em sistemas híbridos ou combinados com baterias para otimizar o fornecimento de energia em diferentes perfis de operação. No entanto, a infraestrutura de abastecimento de hidrogénio ainda é limitada, o que dificulta a sua implementação em locais remotos ou com logística complexa.

### Exemplos de aplicação internacionais

A seguir, apresentam-se projetos e caso de uso implementados internacionalmente, com diferentes níveis de maturidade.

- Maquinaria pesada totalmente eletrificada

A Nasta AS, em parceria com a ABB e Hitachi, desenvolvem maquinaria para movimentação de cargas totalmente eletrificada, a partir do *retrofit* de maquinaria a gasóleo, com ganhos ambientais, de eficiência, redução de ruído. Um exemplo de maquinaria desenvolvida é uma escavadora de rastros, totalmente eletrificada, de 38 toneladas, alimentada por cabo flexível (Figura 4.1).

- ▶ Figura 4.1. Escavadora elétrica de rastros, de 38 toneladas, com alimentação por cabo flexível (Fonte: Nasta AS [1]).



- Camiões de mineração elétricos alimentados por catenária

A *Liebherr* disponibiliza equipamentos eletrificados para a lavra mineira, incluindo camiões fora-de-estrada elétricos alimentados por catenárias, capazes de reduzir em até 80% as emissões de GEE, em comparação com o uso de combustíveis fósseis (Figura 4.2).

- ▶ Figura 4.2. Camião fora-de-estrada elétrico alimentado por catenária (Fonte Liebherr [2])



- Pilhas de combustível a hidrogénio no transporte pesado

A Anglo American, em colaboração com a ENGIE, adapta camiões para funcionar com células de combustível a hidrogénio, eliminando emissões de carbono e validando a viabilidade desta tecnologia no setor (Figura 4.3).

- ▶ Figura 4.3. Camião fora-de-estrada, adaptado e equipado com pilhas de combustível a hidrogénio (Fonte: Anglo American [3]).



- Mina Aitik, Suécia

Um projeto-piloto, apoiado pela Agência Sueca de Energia e desenvolvido em parceria com vários parceiros, incluindo a ABB e a Eitech (infraestrutura elétrica), a Caterpillar e a Pon Equipment (conversão dos camiões), e a Boliden (utilizador final) teve como objetivo a eletrificação de camiões a gásó-

leo na mina a céu aberto de Aitik, na Suécia (Figura 4.4). O projeto procurou assegurar que o transporte de uma parte significativa das cerca de **70 milhões de pedra** movimentadas anualmente, pudesse ser realizada sem recurso a combustíveis fósseis.



Para tal, os camiões a gasóleo foram convertidos em elétricos e foram instalados **700 metros de catenária**, o que permitiu a **redução em cerca de 830 m<sup>3</sup> do consumo anual de gasóleo**, resultando numa **diminuição das emissões de gases de efeito estufa de até 80%** nas rotas onde a tecnologia foi implementada.

- Figura 4.4. Camião elétrico ligado a um sistema de catenária na mina de Aitik, na Suécia (Fotografia: Mats Hillblom) [4].



- Projeto *Electric Site*

O projeto *Electric Site*, desenvolvido pela Volvo CE em colaboração com a Skanska, teve como objetivo a eletrificação total de uma pedreira. Foram usados protótipos de máquinas elétricas e autónomas, novos métodos de trabalho e sistemas de gestão e otimização de rotas. O projeto envolveu o uso de oito transportadores de carga Volvo HX2 autónomos HX02 (Figura 4.5), com motores elétricos a bateria, para transporte do material do britador móvel primário até ao britador fixo secundário. Estes transportadores seguem um percurso pré-programado com GPS e estão equipados com um sistema de “visão” que permite reconhecer obstáculos, evitando colisões. [5]



- Figura 4.5. Protótipo HX02, transportador de carga autónomo e elétrico a bateria. (Fonte: Volvo CE [5]).

Foram também usados neste projeto demonstrador outros equipamentos desenvolvidos pela Volvo, como uma escavadora EX01, de 70 toneladas, híbrida (figura 4.6), incorporando um motor elétrico e um motor gasóleo, e com alimentação por cabo.

- Figura 4.6. Protótipo EX01, escavadora com dupla alimentação gasóleo/elétrica, e alimentação por cabo (Fonte: Volvo CE [5]).



## 4.2.2. Eletrificação de equipamentos auxiliares

### Bombas de água elétricas

As operações de bombagem de água são muito comuns em pedreiras sendo, geralmente, realizadas com motobombas a gasóleo. A eletrificação destes equipamentos (figura 4.7), apresenta vantagens ambientais e operacionais significativas, sobretudo quando a eletricidade utilizada provém de fontes renováveis, nomeadamente:

- a) menor custo operacional;
- b) eliminação de derrames de combustível;
- c) ausência de emissões de GEE.

A sua principal limitação é a menor portabilidade, uma vez que dependem de cabos para fornecimento de energia, e o seu custo, embora este esteja a diminuir.

- Figura 4.7. Bomba elétrica (Fonte: Atlas Copco [6]).



## Compressores de ar elétricos

Os compressores de ar são essenciais para as diferentes operações realizadas nas (perfuração, desmonte, etc.). Geralmente utilizam-se compressores de ar a gásóleo, com impactos negativos, ao nível das emissões de GEE e partículas. A substituição de compressores de ar elétricos, oferece, além dos benefícios ambientais decorrentes da redução de emissões poluentes, outras vantagens, como níveis de ruído mais baixos e a menor necessidade de manutenção.

Os principais desafios da sua utilização são o acesso limitado à rede em zonas remotas, e o custo inicial mais elevado, em comparação com as versões a gásóleo; embora este possa ser compensado, a longo prazo, pela maior eficiência energética e pela menor necessidade de manutenção.

## Referências

- [1]. NASTA AS, "Zero emission construction machinery," Nasta. [Online]. Disponível em: <https://www.nasta.no/anleggsmaskiner/spesialmaskiner/elektriske-anleggsmaskiner/zero-emission-construction-machinery/>
- [2]. Liebherr International AG, "Zero emission mining," Liebherr. [Online]. Disponível em: <https://www.liebherr.com/en-us/group/magazine/zero-emission-mining/zero-emission-mining-3782135>
- [3]. "Anglo American puts world's largest hydrogen truck to work," MINING.COM. [Online]. Disponível em: <https://www.mining.com/anglo-american-puts-worlds-largest-hydrogen-truck-to-work>
- [4]. L. Lindgren, A. Grauers, J. Ranggård e R. Mäki, "Drive-Cycle Simulations of Battery-Electric Large Haul Trucks for Open-Pit Mining with Electric Roads," *Energies*, vol. 15, no. 13, p. 4871, 2022. doi: 10.3390/en15134871. [Online]. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/en15134871>
- [5]. "Testing begins at world's first 'emission-free' quarry," Volvo CE, 2018. [Online]. Disponível em: <https://www.volvoce.com/global/en/news-and-events/news-and-stories/2018/testing-begins-at-worlds-first-emission-free-quarry>
- [6]. Atlas Copco, "Sustainable quarries are the future," Atlas Copco. [Online]. Disponível em: <https://www.atlascopco.com/pt-pt/construction-equipment/resources/blog/sustainable-quarries-are-the-future>



### 4.3. Energia Elétrica Renovável

A adoção de energias renováveis, como a solar e a eólica, permite diminuir a dependência de combustíveis fósseis e reduzir as emissões carbónicas. A instalação de painéis fotovoltaicos e coletores solares possibilita a produção de eletricidade e calor a partir do sol, enquanto a utilização de aerogeradores em pedreiras oferece uma fonte adicional de

eletricidade limpa, especialmente em locais com boas condições de vento. Estas soluções contribuem para reduzir o consumo de energia convencional. A cogeração renovável de alta eficiência, que aproveita simultaneamente eletricidade e calor, permite ainda otimizar o uso da energia e reduzir perdas.

#### 4.3.1. Produção de energia elétrica com solar fotovoltaico

Sara Freitas

APREN – Associação Portuguesa de Energias Renováveis

##### Recurso solar

Portugal é um dos países da Europa onde o recurso solar é mais generoso, sendo a metade sul relativamente mais beneficiada do que a norte: por um lado, tem-se a cidade de Lisboa como 3ª capital europeia com mais horas de sol por ano e uma irradiação média no plano horizontal próxima de 1,7 MWh/m<sup>2</sup>/ano e, por outro lado, conforme a Figura 4.8, a sul, tem-se por exemplo Faro onde a mesma ascende aos 1,9 MWh/m<sup>2</sup>/ano e, mais a norte, no Porto esta reduz-se ligeiramente para 1,6 MWh/m<sup>2</sup>/ano.

Deste modo, considerando uma eficiência de conversão da irradiação para eletricidade de cerca de 20% e um fator de desempenho de 90%, grosseiramente se pode calcular um potencial fotovoltaico médio próximo de 300 kWh por metro quadrado de painel na horizontal, por ano, em Portugal.

O aproveitamento da radiação solar através da tecnologia fotovoltaica permite a produção de eletricidade sem emissões locais, sem ruído ou neces-

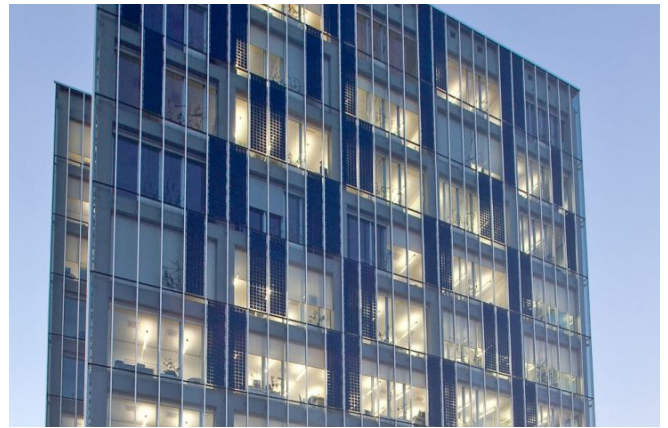


► Figura 4.8. Irradiação solar anual no plano horizontal na Península Ibérica (Fonte: PVGIS).

sidade de partes móveis. Pela sua modularidade e pequena dimensão unitária, possibilita diversas formas de aplicação ou integração quer seja em cobertura, fachada, no solo, ou noutras (Figura 4.9), e um processo de instalação relativamente simples e

célere. Além disto, é uma tecnologia cujos custos de fabrico dos seus componentes têm vindo a decrescer significativamente ao longo dos anos (fruto da manufatura ter transitado na sua grande maioria para países asiáticos), chegando ao consumidor final a preços muito mais acessíveis hoje do que há

1 ou 2 décadas e incluindo cada vez mais soluções inovadoras ao nível das cores, flexibilidade, forma e transparência.



► Figura 4.9. Exemplos de instalações fotovoltaicas no meio edificado: cobertura curva numa estação de comboios (esquerda, superior); painéis orientados Este-Oeste num supermercado (esquerda, inferior); módulos semi-transparentes em fachada (direita, superior); e estrutura de sombreamento num estacionamento (direita, inferior). (Fontes: FirstRule, Solis-Lisboa, GJP, SunEnergy).

Estando os módulos solares certificados para um alto desempenho durante pelo menos 25 anos (isto é, uma redução máxima da potência nominal até 80%), apenas será necessário realizar a correta monitorização e manutenção de todo o sistema ao longo do seu tempo de vida, sendo o inversor (para conversão de corrente contínua em alternada) o equipamento mais crítico cuja garantia tipicamente ronda os 10 anos - embora, dependendo do modelo, alguns fornecedores já ofereçam a extensão deste período até mais de 20 anos.

Porém, o fotovoltaico também comporta algumas desvantagens, como por exemplo: a impossibilidade de produção fora das horas de sol; a baixa produtividade específica e densidade de potência (quando comparado com outras tecnologias); ou a diminuição da eficiência de conversão com o aumento da temperatura.

### Autoconsumo fotovoltaico

Através da instalação de um sistema fotovoltaico para autoconsumo, possibilita-se a produção própria de eletricidade para fornecimento dos consumos locais. Assim, é reduzida a compra de eletricidade proveniente da rede a uma comercializadora - por um preço mais elevado do que aquele que custaria a produzi-la através de um sistema próprio - e a dependência de oscilações do mercado ou de política energética. Por sua vez, é desencorajada a venda dos excedentes da produção solar a um agregador de eletricidade, dado que estes têm sido remunerados a um valor pouco atrativo que ronda os 0,06 €/kWh (sem prejuízo de campanhas comerciais mais vantajosas).

No projeto de um sistema fotovoltaico é, portanto, fundamental implementar boas práticas e considerar todos os possíveis condicionantes logo de início. Desde a adequabilidade da orientação, inclinação e capacidade estrutural das superfícies de interesse, à existência de elementos circundantes que possam provocar sombreamento parcial nos módulos, ou até mesmo a presença de espécies animais ou vegetais que possam obstruir ou danificar os equipamentos, diversos aspetos técnicos podem impedir uma maximização do aproveitamento de um bom potencial teórico. Não obstante, o principal critério a avaliar é o nível de correspondência entre o perfil de consumo que se pretende alimentar e o perfil de produção de eletricidade solar.

Para avaliar a viabilidade e tirar o máximo proveito de um autoconsumo fotovoltaico, é crucial analisar em detalhe o perfil de consumos de eletricidade nas instalações às quais se pretende ligar o sistema. Valores acumulados anuais ou mensais podem ajudar a balizar as dimensões do sistema, porém os detalhes técnicos como a melhor orientação ou inclinação dos painéis só são possíveis de estimar através da análise de curvas diárias típicas, em diferentes dias da semana e alturas do ano, com a melhor resolução temporal possível. Isto porque o consumo de eletricidade varia conforme a utilização das instalações e dos equipamentos, o que por sua vez é afetado não só pelos turnos dos ocupantes e pelos horários das tarefas, mas também por

fatores do ambiente como a temperatura, luz solar, pluviosidade, entre outros. No fundo, é essencial perceber se o perfil de consumo se consegue adaptar a uma unidade de produção para autoconsumo (UPAC) fotovoltaica, no curto e no longo prazo.

É igualmente importante ter uma visão de futuro em paralelo com intervenções que venham a aumentar a eficiência energética no local, tais como a substituição de equipamentos e dispositivos para outros mais eficientes ou a eletrificação de processos e

atividades ainda baseados em recursos fósseis. Desta forma, poderá dimensionar-se o sistema fotovoltaico, ou acautelar uma futura expansão do mesmo, considerando desde logo as alterações expectáveis no consumo de eletricidade.

## O individual e o coletivo

Em Portugal, o regime do autoconsumo individual (ACI) entrou em vigor somente a partir de 20 de outubro de 2014, com a publicação do Decreto-Lei n.º 153/2014, tendo sido introduzidos os moldes do autoconsumo coletivo (ACC) e das comunidades de energia renovável (CER), cerca de 5 anos mais tarde, por via do Decreto-Lei n.º 162/2019. Atualmente, é o Decreto-Lei n.º 15/2022 que regula o autoconsumo, na sua versão atual dada pelo Decreto-Lei n.º 99/2024.

O autoconsumo tem sofrido um incremento significativo de ano para ano, evidente após a introdução dos novos regimes jurídicos e a disponibilização de apoios à aquisição e instalação dos sistemas, abrangendo um pouco todos os setores. No lado da indústria, comércio e serviços, têm sido particularmente relevantes os POSEUR, PRR e Programas do Fundo Ambiental na alavancagem de diversas instalações fotovoltaicas a par com a implementação de medidas de eficiência energética como um todo. Por sua vez, a mudança de paradigma do autoconsumo individual para o coletivo tem sido um pouco

mais lenta, dada a maior complexidade administrativa e técnica envolvida.

Apesar da mais demorada adoção, são já vários os exemplos de aproveitamentos coletivos que optaram por principiar-se como ACC, pela maior simplicidade, tendo como objetivo futuro constituir-se como CER e alargar a sua abrangência geográfica. Entre estes, diversos estão estabelecidos entre comércio e serviços, indústria e residencial, entre o setor público e o privado.

Na **Tabela 1**, exemplificam-se alguns perfis de consumo e de produção de eletricidade solar em diversas configurações de autoconsumo que podem ser consideradas:

**a) autoconsumo individual:**

- os consumos de eletricidade são constantes desde o início da manhã até ao início da noite, diminuindo no período noturno;
- a produção fotovoltaica é máxima nas horas próximas do zénite solar - típico de sistemas com orientação a sul.



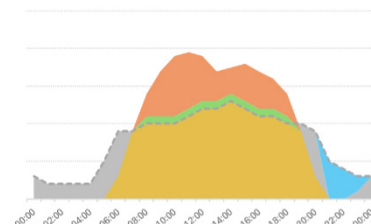
**b) igual a A) mas:**

- a produção fotovoltaica tem um pico de manhã e outro à tarde - típico de sistemas com orientação este-oeste.



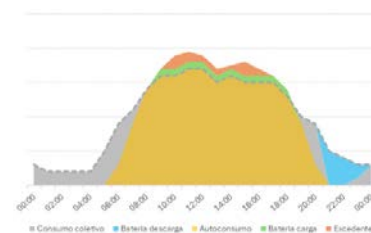
**c) igual a B) mas o sistema possui armazenamento com baterias que:**

- o carregam com o excedente solar;
- o descarregam durante o período de consumos noturnos.



**d) autoconsumo coletivo ou comunidade de energia:**

- os consumos de outras instalações vizinhas durante o período diurno absorvem parte dos excedentes solares.



► Tabela 4.1. Exemplos ilustrativos de autoconsumo individual (de A a C) e coletivo (D).

No encadeamento das situações ilustrativas anteriores, torna-se evidente o incremento na taxa de autoconsumo do sistema fotovoltaico, através da exploração de outras orientações e inclinações que permitam tirar melhor partido do ciclo circadiano, pela introdução de armazenamento da eletricidade solar excedente e pela participação de outros consumidores e/ou produtores. Em cenários mais

complexos onde o perfil de consumos do agregado permita absorver mais excedente, poderá ainda ser possível reduzir as necessidades de armazenamento e, assim, o investimento inicial.

É evidente que uma total autossuficiência, em qualquer das configurações anteriores, se torna praticamente impossível de alcançar devido aos

consumos noturnos. Contudo, além do armazenamento da eletricidade solar em baterias, é possível “armazená-la como calor”, isto é, tirando partido do excedente, recorrer a bombas de calor para a produção de água quente ou fria, ou de ar quente ou frio, a aproveitar mais tarde nos processos industriais ou mesmo na (pré-)climatização de espaços. Deste modo, salienta-se novamente a importância de pensar todo o sistema fotovoltaico e os seus moldes de operação e exploração numa lógica de eficiência energética geral.

Finalmente, importa referir que o autoconsumo reduz o recurso à rede elétrica, trazendo poupança na fatura energética, mas que haverá sempre alturas em que o recurso solar estará ausente ou a quantidade de energia armazenada não será suficiente para as necessidades. A rede elétrica estará, assim, disponível para colmatar a procura na ausência da produção renovável local, permitindo-se, assim, uma gestão própria dos sistemas de energia e, conseqüentemente, a otimização dos custos com eletricidade através da escolha de tarifa que se adapte melhor ao calendário e horários das atividades.

#### 4.3.2. O impulso que as comunidades de energia oferecem à competitividade no setor da pedra natural

Rui Queiroga

Account Executive da Cleanwatts

No âmbito da estratégia de descarbonização do setor da pedra natural em Portugal, as Comunidades de Energia Renovável (CER) assumem um papel fundamental e inovador. Estas comunidades congregam empresas, infraestruturas e habitantes de uma mesma área geográfica para produzir, partilhar e consumir energia limpa de forma colaborativa, aproximando a produção do consumo e gerando benefícios ambientais, económicos e sociais. O conceito de produtor âncora – geralmente uma unidade industrial ou infraestrutura com elevado consumo energético – é especialmente pertinente para este setor, permitindo instalar centrais fotovoltaicas de grande dimensão, capazes de satisfazer as necessidades energéticas do produtor e distribuir o excedente por outros membros da comunidade, sejam empresas vizinhas ou residentes locais.



- Unidade industrial com painéis fotovoltaicos na cobertura, integrada numa comunidade de energia renovável, promovendo a produção local de eletricidade limpa, a partilha eficiente de energia e a redução da pegada carbónica.



A constituição destas comunidades obedece a critérios geográficos rigorosos, promovendo não só a produção e consumo de energia renovável, mas também a redução da dependência da rede elétrica nacional. Para setores industriais como o da pedra natural, onde a energia representa uma parcela significativa dos custos operacionais e das emissões de carbono, esta proximidade entre geração e consumo traduz-se numa diminuição das perdas energéticas, menor dependência da rede e ganhos diretos em competitividade e sustentabilidade. Adicionalmente, a partilha de excedentes energéticos a preços inferiores aos praticados no mercado reforça a atratividade do território e dos ativos das empresas, promovendo a coesão territorial e a acessibilidade à energia.

O setor da pedra natural tem vindo a investir na descarbonização através de:

- Aumento da eficiência energética e otimização dos processos de extração e transformação;
- Substituição gradual de combustíveis fósseis por fontes renováveis, como energia solar e eólica, hidrogénio verde e biometano;
- Implementação de tecnologias digitais e equipamentos elétricos para reduzir a pegada ambiental e melhorar a eficiência.



- ▶ Pavilhão industrial com cobertura equipada com central fotovoltaica, aproveitando a área disponível para a produção de energia limpa destinada ao autoconsumo no processo produtivo.

No entanto, para que o setor consiga atingir as metas de descarbonização, é essencial participar na transformação do atual modelo da rede elétrica, evoluindo para redes mais complexas, multidirecionais e digitalizadas, aptas a integrar múltiplas fontes renováveis de forma distribuída e a responder à crescente eletrificação dos processos industriais. As CER, ao promoverem o equilíbrio entre a eletricidade produzida e consumida numa área delimitada, contribuem para uma gestão mais eficiente, estável e segura da rede elétrica, reduzindo perdas e aumentando a capacidade de resposta a perturbações. A introdução de sistemas inteligentes de comando e controlo local potencia ainda mais a otimização dos recursos integrados.

A digitalização das redes elétricas, com recurso a tecnologias avançadas, permite uma comunicação bidirecional entre todos os intervenientes do sistema – operadores de rede, produtores, consumidores, agregadores e operadores de carregamento de veículos elétricos. Esta rede digital integra a geração descentralizada, sistemas de armazenamento, micro-redes e centrais virtuais, aproveitando o potencial de edifícios inteligentes e da Internet das Coisas (IoT), tornando as redes mais fiáveis, resilientes e capazes de responder automaticamente a interrupções ou necessidades de reconfiguração. A introdução de elementos com comportamento não linear e menor inércia, como as renováveis e o armazenamento, exige novos modelos dinâmicos para avaliar a estabilidade e resiliência da rede. Neste cenário, a digitalização e monitorização contínuas, aliadas a sistemas de automação, são cruciais para antecipar e mitigar riscos, assegurando a continuidade e segurança do fornecimento energético.

Para as empresas do setor da pedra natural que pretendem liderar a transição para a sustentabilidade energética, estas soluções integradas trazem impactos ambientais, económicos e sociais relevantes.

A integração das CER no setor da pedra natural proporciona:

- Redução expressiva das emissões de CO<sub>2</sub> e outros poluentes, alinhando-se com os objetivos nacionais e europeus de neutralidade carbónica até 2050;
- Redução dos custos operacionais e aumento da competitividade das empresas, tornando o setor mais resiliente a choques externos e à pressão regulatória;
- Fomento de competências e inovação, promovendo a digitalização, automação e qualificação dos trabalhadores para a indústria do futuro;
- Envolvimento das comunidades locais e criação de novos modelos de negócio, com partilha de benefícios e reforço da coesão territorial.

Por um lado, estas comunidades permitem diminuir a pegada ambiental e descarbonizar os processos produtivos, promovendo o uso de energia limpa e local. Por outro, contribuem para a redução dos custos energéticos, aumentam a competitividade e protegem as empresas perante a volatilidade dos preços da energia. Além disso, ao envolver colaboradores e comunidades locais, as CER reforçam a coesão territorial, aumentam a acessibilidade à energia e geram oportunidades de partilha de excedentes a preços mais acessíveis.

A gestão eficiente destas comunidades exige plataformas digitais avançadas, capazes de otimizar a produção e o consumo, considerando variáveis como a disponibilidade de energia, flexibilidade das cargas, armazenamento e necessidades do operador do sistema. Os algoritmos de inteligência artificial ganham cada vez mais importância para garantir a robustez do sistema e a adaptação aos perfis de consumo industrial e residencial.

Descarbonizar o setor da pedra natural passa, assim, por investir na produção de eletricidade limpa e na eletrificação dos processos, substituindo progressivamente os combustíveis fósseis por recursos renováveis. Graças aos avanços tecnológicos, como painéis fotovoltaicos mais eficientes, sistemas de armazenamento e veículos elétricos, esta transição energética é cada vez mais local e centrada no utilizador, promovendo uma abordagem democrática e participativa. As CER, com o seu carácter local e sustentável, são agentes fundamentais neste novo paradigma, contribuindo para o equilíbrio da rede elétrica e acelerando a transição energética do setor da pedra natural em Portugal.



- Central fotovoltaica dimensionada acima das necessidades energéticas da unidade industrial, permitindo o aproveitamento do excedente de produção através da sua integração numa comunidade de energia renovável, promovendo a partilha local de energia limpa e a maximização da eficiência energética.

### 4.3.3. Cogeração renovável

A cogeração renovável é uma estratégia eficaz para otimizar o uso de energia, através da produção simultânea de eletricidade e calor, a partir fontes renováveis. O calor residual, em vez de ser desperdiçado, é aproveitado para aquecimento (em processos industriais, climatização, etc.). A adoção de

sistemas de cogeração renovável permite otimizar o uso da energia disponível, melhorar a eficiência energética global, reduzir os custos operacionais, e contribuir para a redução das emissões de GEE.



## 4.4. Combustíveis de Baixo Carbono

A extração de pedra natural tem um impacto ambiental inferior ao de outros materiais, mas continua a gerar emissões significativas de CO<sub>2</sub> devido ao uso intensivo de gásóleo, na maquinaria pesada e no transporte. Alinhar o setor com os objetivos de descarbonização nacionais e europeus exige a substituição progressiva do gásóleo por alternati-

vas mais sustentáveis, como os biocombustíveis, combustíveis sintéticos ou gases renováveis, que permitem reduzir as emissões sem comprometer a eficiência operacional, cumprindo com os critérios de sustentabilidade previstos na diretiva RED (*Renewable Energy Directive*).

### 4.4.1. Biocombustíveis na descarbonização do setor da pedra natural

João Pinho, Gonçalo Lourinho, Carolina Gonçalves, Joana Bernardo, Francisco Gírio

*Laboratório Colaborativo para as Biorefinarias*

A extração de pedra natural é um processo essencial para diversos setores, destacando-se o setor da construção. Apesar de apresentar um impacto ambiental inferior ao da produção de outros materiais de construção, este processo é, ainda assim, diretamente responsável por um conjunto de emissões de CO<sub>2</sub> resultantes do consumo de combustíveis fósseis, principalmente gásóleo, utilizado tanto nas máquinas pesadas como no transporte do material desde as pedreiras até aos locais de uso final. Tendo em conta os objetivos europeus e nacionais em matéria de descarbonização, torna-se, cada vez mais, necessário alinhar esta atividade com as práticas atuais mais sustentáveis.

Na etapa de extração da pedra natural, o uso de máquinas pesadas (perfuradoras, escavadoras e bulldozers) contribui, de forma substancial, para as emissões do setor, dado que estes equipamentos

são movidos maioritariamente a gásóleo [1], [2]. Por outro lado, o transporte, predominantemente feito por camiões movidos a gásóleo, influencia diretamente o volume total de emissões ao longo da cadeia de valor, podendo facilmente representar entre 25-30 % do consumo total de gásóleo no processo.

Desta forma, a descarbonização do setor da pedra natural depende essencialmente da substituição do gásóleo fóssil por opções mais sustentáveis. O presente capítulo explora as alternativas disponíveis para reduzir as emissões de carbono da cadeia de produção de pedra, com foco em soluções sustentáveis como os biocombustíveis e combustíveis sintéticos sem comprometer a eficiência operacional.

## Biocombustíveis e combustíveis sintéticos: o que são e como se produzem?

Os biocombustíveis são combustíveis líquidos ou gasosos produzidos a partir de biomassa e desempenham um papel crucial na descarbonização do setor de transportes e de indústrias cujas máquinas e frotas dependem de motores a combustíveis fósseis. Exemplos de biocombustíveis incluem o biodiesel, também referido como *FAME* (sigla inglesa para ésteres metílicos de ácidos gordos), *HVO* (sigla inglesa para óleo vegetal hidrotratado), bioetanol, biometanol, Bio-DME (dimetil éter de origem renovável) e biocombustível obtido por *Fischer-Tropsch*. Entre os substitutos do gasóleo, os mais utilizados atualmente são o biodiesel e o *HVO*, cada um com diferentes características e processos de produção, assim como implicações distintas em termos de sustentabilidade, eficiência e viabilidade técnica.

O biodiesel é obtido através da transesterificação de óleos vegetais pré-tratados e álcoois como o metanol. A reação é catalisada com recurso a catalisadores como o hidróxido de sódio e o processo gera glicerol como co-produto. A produção de *HVO*, por outro lado, realiza-se através de uma série de etapas sequenciais que incluem: i) hidrotratamento, ii) hidrogenação completa de gorduras vegetais pré-tratadas, removendo as insaturações presentes nos triglicerídeos da matéria-prima e iii) isomerização, melhorando a estabilidade do combustível a temperaturas reduzidas [3], [4]. O resultado é um produto semelhante ao gasóleo e mais puro que o

biodiesel, ainda que com custos de produção mais elevados. Da produção de *HVO* são co-produtos a bionafta (substituto da gasolina) e o biopropano [5]. O *HVO* destaca-se ainda pela elevada compatibilidade com motores a gasóleo e pela excelente qualidade como substituto direto do gasóleo fóssil. O biodiesel pode ser produzido de maneira mais simples e económica, mas ambos os combustíveis oferecem reduções nas emissões de gases com efeito estufa de até cerca de 90 %, e a sua implementação pode ser uma estratégia essencial para atingir a descarbonização de máquinas e veículos equipados com motores a gasóleo.

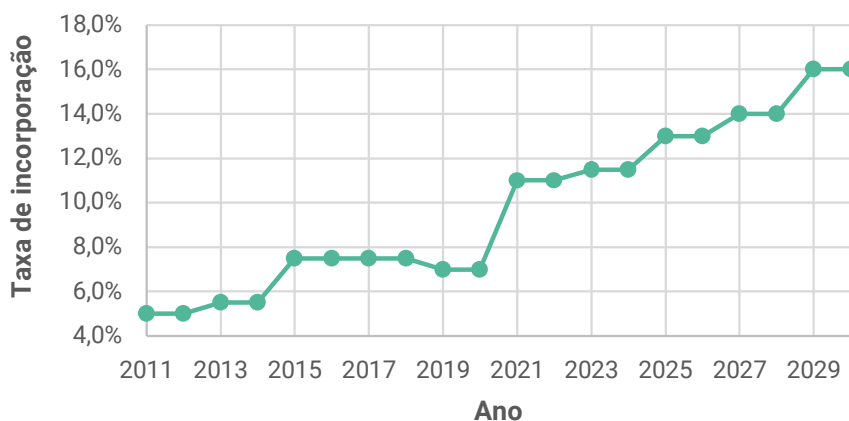
Os combustíveis sintéticos são combustíveis líquidos ou gasosos obtidos através de energia renovável não derivada da biomassa. Destes combustíveis destacam-se aqueles cuja fonte de hidrogénio é a eletrólise da água, sendo o carbono proveniente de processos de captura de CO<sub>2</sub>, seja de chaminés industriais ou diretamente do ar. Estes combustíveis ainda se encontram numa fase de desenvolvimento tecnológico relativamente baixa, que tem como objetivo reduzir custos de capital e operacionais, pelo que a sua produção a nível industrial é ainda residual. Assim sendo, os biocombustíveis avançados deverão ser o foco dos investimentos a curto-prazo a nível industrial devido a melhores oportunidades de valorização financeira.

### Os biocombustíveis no contexto nacional

As políticas públicas têm contribuído significativamente para o aumento da produção de biocombustíveis em Portugal. Atendendo ao potencial de sustentabilidade das matérias-primas utilizadas, a legislação nacional (Decreto-lei nº84/2022) introduziu nos últimos anos o conceito de “biocombustíveis avançados” enquanto “*biocombustíveis produzidos a partir de matérias-primas específicas, tipicamente de origem residual ou não alimentar*”, numa tentativa de promover a utilização de substratos que não compitam direta ou indiretamente com a alimentação e utilização de sólidos agrícolas [6]. Nesse sentido, têm sido promovidas matérias-primas como as algas, cujo cultivo não implique o

uso ou destruição de solos com aptidão agrícola, os biorresíduos sujeitos a recolha seletiva e a biomassa residual proveniente das atividades agrícolas.

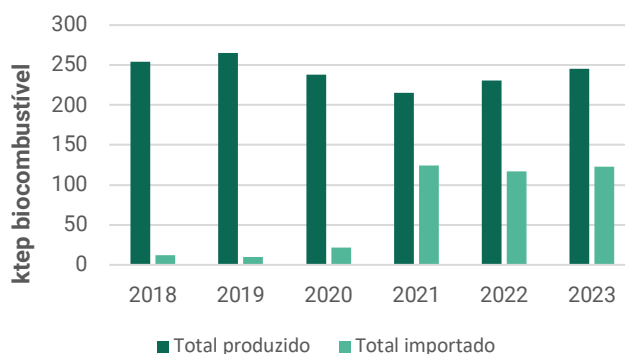
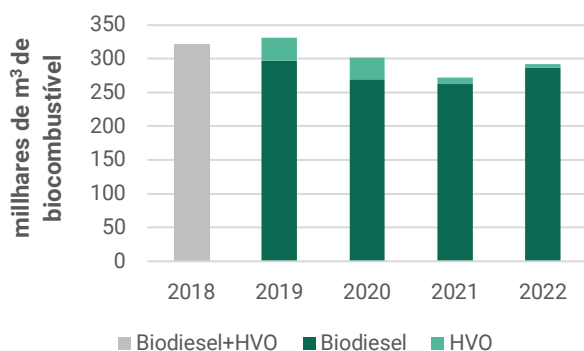
A Figura 4.10 representa o histórico, presente e futuro das metas de incorporação de combustíveis de baixo teor em carbono, em Portugal no transporte rodoviário, em teor energético, beneficiando os biocombustíveis avançados e combustíveis produzidos a partir de óleos alimentares usados de dupla contagem, de modo a promover a utilização de matérias-primas sustentáveis.



► Figura 4.10. Metas de incorporação de biocombustíveis nos combustíveis de transporte terrestre (até 2021) e de combustíveis de baixo teor em carbono nos combustíveis rodoviários (a partir de 2022). (Fontes: Decreto-Lei nº 117/2010, de 25 de outubro e Decreto-Lei nº 84/2022 de 9 de dezembro, com as correções introduzidas pelos orçamentos de estado de 2018 e 2019 para o intervalo de 2017 a 2020) [6]–[8].

A Figura 4.11, por sua vez, apresenta o volume e a composição da produção de biocombustíveis a nível nacional, bem como a comparação entre os biocombustíveis produzidos e importados desde 2018 [9]. Como se pode verificar pela figura, a produção nacional de biocombustíveis tem mantido uma ligeira tendência de redução ao longo dos anos, ao passo que a importação de biocombustíveis tem aumentado significativamente. Além disso, verifi-

ca-se ainda que a produção nacional está focada na produção de substitutos do gasóleo, essencialmente FAME e HVO. A produção de biocombustíveis alternativos à gasolina encontra-se apenas em alguns pequenos produtores dedicados, cujos dados são pouco representativos, pelo que a incorporação de alternativas à gasolina tem sido garantida por via de importações de bioetanol.

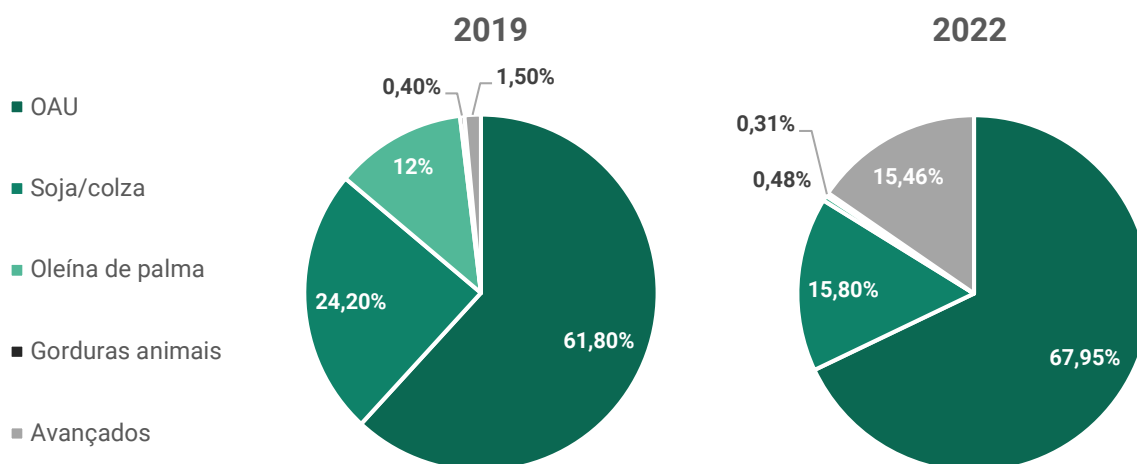


► Figura 4.11. Evolução do volume de produção e composição de biocombustíveis em Portugal (à esquerda) e comparação entre o total produzido e importado (à direita) [9].

A diminuição da produção nos anos de 2020 e 2021 pode ser explicada pela COVID-19, mas também por uma alteração relevante no panorama das matérias-primas utilizadas em solo nacional para a produção de biocombustíveis, tal como observado na Figura 4.12. De facto, entre 2019 e 2022, a utilização de oleína de palma foi praticamente substituída pela utilização de matérias-primas elegíveis no contexto do Decreto-Lei nº84/2022 de forma a

classificar os biocombustíveis produzidos como “biocombustíveis avançados”. Ainda assim, apenas 8,7 % do volume de biocombustíveis produzidos em solo nacional tem origem em matéria-prima nacional (ano de referência 2022), destacando-se a utilização de glicerina não-refinada e os resíduos da indústria alimentar da produção de margarinas e molhos e os óleos alimentares usados, um valor que se encontra em linha com os anos anteriores.





► Figura 4.12. Distribuição das matérias-primas utilizadas na produção nacional de biocombustíveis, em 2019 (à esquerda) e 2022 (à direita) [5], [10]. A legenda é compartilhada para ambos os gráficos.

Apesar dos avanços recentes em termos de política pública, existe ainda um grande potencial no mercado de biocombustíveis em Portugal, devendo a sua produção ser incentivada e escalada no sentido de reduzir custos para o consumidor final. O relatório mais recente da ENSE, por exemplo, indica que entre 2019 e 2021 o peso dos biocombustíveis no preço dos combustíveis aumentou 142 % para a gasolina (2,7 cêntimos) e 205 % (6,7 cêntimos) para o gasóleo [11]. No mesmo período, a taxa de incorporação mínima aumentou também de 7 % para 11 %. Além disso, o fim da isenção de ISP sobre os biocombustíveis avançados em 2025 pode originar um novo aumento dos preços, criando dificuldades na aceitação social destes novos combustíveis.

Contudo, o panorama nacional é de crescimento do setor dos biocombustíveis com sinais muito positivos por parte dos vários intervenientes no mercado. Neste momento, existem já opções de combustível com incorporação de 15 % de biocom-

bustíveis, como é o caso do Ecodiesel da PRIO e até gasóleo 100 % renovável (HVO), disponibilizado pela GALP [12], [13]. Também fabricantes de automóveis, como a *Stellantis* (que inclui as marcas Fiat e Peugeot, entre outras), têm relatado testes com HVO a 100 % nos seus motores a gasóleo, declarando compatibilidade total [14].

Os investimentos realizados em I&D, inovação e na descarbonização no setor dos transportes são também eles uma *driving force* essencial para atingir as metas de incorporação de biocombustíveis presentes na legislação e no cumprimento dos objetivos do Plano Nacional de Energia e Clima 2030 (PNEC2030), que prevê o consumo de 423 tep de biocombustíveis no setor dos transportes em 2030, 83 % dos quais biocombustíveis avançados. Espera-se, também, que as emissões associadas ao setor dos transportes em 2050 sejam reduzidas em 98 % face a 2005. A nível de emissões, a intensidade carbónica média dos combustíveis disponíveis em Por-

tugal, incluindo a gasolina e o gasóleo, foi de 89,5 g CO<sub>2</sub> eq/MJ em 2021 [15]. A Diretiva 2018/2001, de 11 de dezembro, na sua revisão atual (RED III, anexo V), apresenta as regras para o cálculo do impacto dos biocombustíveis na emissão de GEE [16]. A título de exemplo, o biodiesel produzido a partir de óleos alimentares usados (a matéria-prima mais utilizada em Portugal, segundo a Figura 4.12) apresenta um valor típico de emissões de 11,2 g CO<sub>2</sub> eq/

MJ, incluindo o cultivo, processamento, transporte e distribuição. Assim, a redução alcançada pelos “biocombustíveis avançados” é consistentemente superior a 70 %. Tendo em conta este contexto, a descarbonização do setor da pedra natural através da utilização de “biocombustíveis avançados” apresenta um excelente potencial a nível nacional.

### Biocombustíveis vs. Eletrificação: existe alternativa?

Outro vetor de descarbonização da produção de pedra natural é a eletrificação das frotas e máquinas das empresas do setor. No entanto, a disponibilidade de equipamento eletrificado não é ainda universal e a eletrificação exige novos investimentos em veículos como tratores e bulldozers que, enquanto maquinaria pesada, são considerados de difícil eletrificação (“*hard-to-electrify*”) dada a menor viabilidade em termos técnicos e operacionais.

Ainda assim, têm-se registado avanços nos últimos anos, nomeadamente através da introdução de perfuradoras e serras elétricas na etapa de extração. Além disso, importa referir que a eletrificação não é suficiente, por si só, para descarbonizar os processos de produção e depende da própria incorporação de renováveis na matriz energética. A matriz portuguesa evoluiu de 52,6 % de renová-

veis em 2015 para 65,2 % em 2023 (DGEG), o que é assinalável, mas pressupõe ainda a utilização de combustíveis fósseis na produção da eletricidade disponível na rede [17]. Em alternativa, as empresas podem apostar no autoconsumo a partir de fontes renováveis enquanto a matriz energética do país não estiver completamente descarbonizada, mas isso implica capacidade de investimento e *know-how* especializado.

Desta forma, e dependendo da taxa de incorporação de biocombustíveis nos combustíveis utilizados nos transportes e da utilização de matérias-primas sustentáveis para a sua produção, a utilização de biocombustíveis deverá ser a opção mais viável de descarbonização do setor num curto-médio prazo.

## Conclusão

Em suma, os biocombustíveis são uma solução promissora para a descarbonização em diversas indústrias, nomeadamente nas indústrias consumidoras de combustíveis fósseis, como as que exigem frotas de veículos de transporte de longa distância e maquinaria pesada. Um exemplo é o setor da pedra natural, cuja cadeia de valor inclui o uso intensivo de equipamentos como perfuradoras, escavadoras, *bulldozers* e camiões. Este caso é especialmente interessante, uma vez que o gasóleo é o combustível mais utilizado na indústria e, em Portugal, mais de 95 % dos biocombustíveis produzidos (biodiesel e HVO) são alternativas ao gasóleo.

Embora a produção de biocombustíveis a nível nacional esteja a evoluir gradualmente para o uso de matérias-primas mais sustentáveis, existe ainda uma dependência significativa na utilização de ma-

térias-primas virgens, como a oleína de palma, e tradicionais como os óleos alimentares usados. Esta limitação é agravada pela escassez de matérias-primas adequadas disponíveis no país, destacando-se a necessidade urgente de investir em alternativas e na criação de redes eficientes para a recolha de matérias-primas sustentáveis que possam alimentar o setor. Ainda assim, a utilização de biocombustíveis constitui uma estratégia chave para a redução das emissões de carbono nos transportes e na indústria, incluindo o setor da pedra natural, sendo uma solução custo-eficiente a considerar a curto-médio prazo para a transição energética.

## Referências

- [1]. C. Capitano, L. Cirrincione, G. Peri, G. Rizzo e G. Scaccianoce, "A simplified method for the indirect evaluation of the "embodied pollution" of natural stones (marble) working chain to be applied for achieving the Ecolabel brand of the product," *J. Clean Prod.*, vol. 362, p. 132576, 2022. [Online]. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.132576>
- [2]. D.Ioannidou, "On sustainability aspects through the prism of stone as a material for construction," 2016. [Online]. Disponível em: <https://doi.org/10.3929/ethz-a-010750082>
- [3]. A. Bonomi, B. C. Klein, F. Chagas, N. Rinke e D. Souza, "Comparison of biofuel life cycle analysis tools," *IEA Bioenergy Task*, vol. 39, 2018.
- [4]. M. A. Ershov, V. D. Savelenko, U. A. Makhova, A. E. Makhmudova, A. V. Zuikov, V. M. Kapustin, T. M. M. Abdellatief, N. O. Burov, T. Geng, M. A. Abdelkareem e A. Olabi, "Current challenge and innovative progress for producing HVO and FAME biodiesel fuels and their applications," *Waste Biomass Valorization*, vol. 14, pp. 505–521, 2023.
- [5]. LNEG/ECS, "Relatório sobre o cumprimento dos critérios de sustentabilidade na produção e importação de combustíveis de baixo carbono para transportes em Portugal -2022," 2023
- [6]. República Portuguesa, Decreto-Lei n.º 84/2022, de 9 de dezembro, *Diário da República*, 1.ª série, n.º 236, 2022. [Online]. Disponível em: <https://files.diariodarepublica.pt/1s/2022/12/23600/0000800045.pdf>
- [7]. República Portuguesa, Decreto-Lei n.º 117/2010, de 25 de outubro, *Diário da República*, 1.ª série, n.º 4782, 2010. [Online]. Disponível em: <https://diariodarepublica.pt/dr/detalhe/decreto-lei/117-2010-307650>
- [8]. APPB - Associação Portuguesa de Produtores de Biocombustíveis, *Metas e Obrigações de Incorporação de Biocombustível - Legislação*, 2021.
- [9]. LNEG/ECS, "Boletins Estatísticos Trimestrais - Produção e importação de biocombustíveis e biogás," 2022.
- [10]. LNEG/ECS, "Relatório sobre o cumprimento dos critérios de sustentabilidade na produção e importação de combustíveis de baixo teor de carbono para transportes em Portugal - 2019," 2020.
- [11]. ENSE, "Análise da evolução dos preços de combustíveis em Portugal," 2021. [Online]. Disponível em: [https://www.ense-epe.pt/wp-content/uploads/2021/07/Precos-de-combustiveis-2019-2021\\_ESTUDO-ENSE-Julho-2021.pdf](https://www.ense-epe.pt/wp-content/uploads/2021/07/Precos-de-combustiveis-2019-2021_ESTUDO-ENSE-Julho-2021.pdf)
- [12]. PRIO, "Biocombustíveis: o que são e quais os principais tipos," [Online]. Disponível em: [https://www.prio.pt/pt/biocombustiveis\\_236.html?idb=518](https://www.prio.pt/pt/biocombustiveis_236.html?idb=518).
- [13]. Galp, "Galp lança gasóleo renovável 100%," 2023. [Online]. Disponível em: <https://www.galp.com/pt/pt/empresas/blog/blog-post/gasoleo-renovavel>
- [14]. Stellantis, "Gama Stellantis totalmente compatível com diesel verde HVO," 2024. [Online]. Disponível em: <https://www.media.stellantis.com/pt-pt/corporate-communications/press/gama-stellantis-totalmente-compativel-com-diesel-verde-hvo>
- [15]. Comissão Europeia, *Quality of Petrol and diesel fuel used for road transport in the European Union*, 2021.
- [16]. Parlamento Europeu, *Diretiva (UE) 2018/2001, de 11 de Dezembro, Alterada Pela Diretiva (UE) 2024/1711, de 13 de Junho L328*, vol. 61, 2018, p. 82, 2018
- [17]. DGEG, *Estatísticas rápidas das renováveis*, 2024.

## 4.4.2. Combustíveis sintéticos na descarbonização do setor da pedra natural

Luís Serrano, Ricardo Almeida e Diogo Silva

*Escola Superior de Tecnologia e Gestão - Instituto Politécnico de Leiria*

O setor da pedra natural apresenta um consumo significativo de energia, apresentando necessidades muito específicas, devendo demonstrar a capacidade necessária para responder de forma muito particular aos desafios tecnológicos de descarbonização, de forma a assegurar cumulativamente a sustentabilidade económica e ambiental das empresas e do setor. De facto, ao longo dos vários séculos, a pedra natural tem acompanhado o desenvolvimento da sociedade, contribuindo de forma decisiva para a melhoria da qualidade de vida.

Atualmente, o Mundo e o País já estão a ser afetados pelas alterações climáticas, cujos impactos tenderão a agravar-se no futuro, se as emissões de CO<sub>2</sub> para a atmosfera continuarem a aumentar, devido, em grande parte, à utilização de combustíveis de origem fóssil.

É importante sublinhar a relação intrínseca entre as ações, respostas e impactos associados às alterações climáticas e a implementação de medidas tendentes ao desenvolvimento sustentável, reconhecendo a prioridade fundamental de salvar o território, assinalando a importância de garantir a integridade de todos os ecossistemas e a proteção da biodiversidade, nomeadamente da própria humanidade.

Afirmando a importância da educação, da formação e da sensibilização do público, estas questões têm um impacto significativo nas empresas, principalmente aquelas que pertencem a setores com elevados níveis de consumo de energia, que se vêm obrigadas a implementar medidas no sentido de mitigar as alterações climáticas, mantendo padrões sustentáveis de consumo e produção, desempenhando um papel importante de modo a oferecer um efetivo contributo no cumprimento das metas de descarbonização [1].

### Utilização de energia

Portugal é extremamente dependente de energia, apesar da considerável aposta em energias renováveis [2]. O país apresenta uma dependência energética de cerca de 2/3 relativamente à quantidade de energia que consome, representando 71,2% em 2022. Na União Europeia, Portugal ocupa o 12º lu-

gar dos países com maior dependência energética, com 8,8% acima da média europeia (UE27), correspondente a 62,5%. A produção de energia em Portugal baseia-se de forma muito significativa em energias renováveis que, em 2022, representaram 34,7% do consumo final bruto de energia, sendo es-

tabelecido como meta para 2030 atingir uma cota igual ou superior a 51% [3].

Tendo em consideração este cenário, prevê-se que a concentração dos consumos de todos os setores na energia elétrica possa representar maiores dificuldades em atingir essas metas, sobretudo por limitar as alternativas disponíveis e desincentivar os investimentos noutras soluções viáveis e com elevado potencial, como é o caso dos biocombustíveis e combustíveis sintéticos. Estas opções energéticas, baseadas em hidrocarbonetos com origem renovável, permitem que as atuais frotas de transportes e de máquinas possam continuar a funcionar, contribuindo para a diminuição da dependência energética e, desse modo, abrindo espaço para um futuro que conduza à descarbonização.

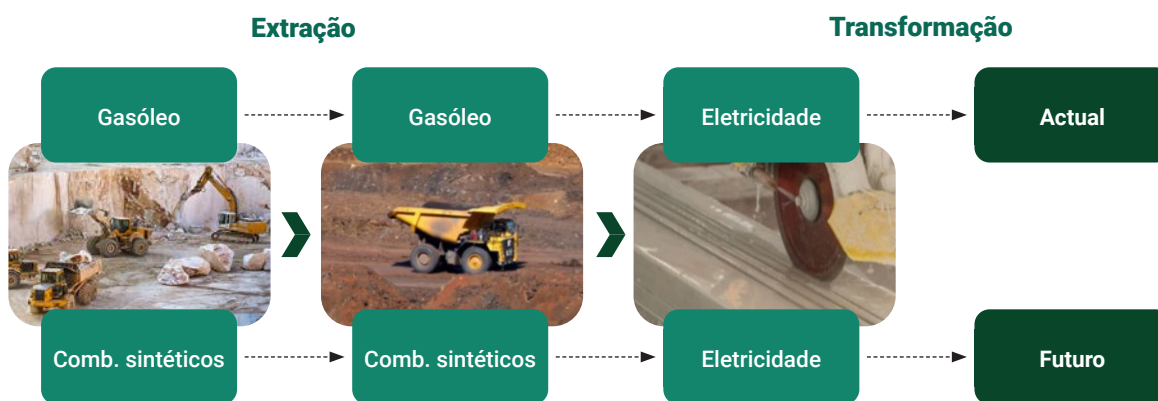
A indústria da pedra consome efetivamente grandes quantidades de energia desde a fase de extração até à transformação em produto final. A extração pode subdividir-se em várias tarefas que incluem perfuração, corte, derrube, esquartejamento, remoção e transporte, embalamento e expedição. A transformação considera o corte primário, tratamento superficial, corte secundário, acabamento, trabalhos especiais, embalamento e expedição. A energia total na produção de pedra natural corresponde à soma dos níveis de energia consu-

midos em cada fase, desde que se separa a pedra na pedreira, passando pela transformação da pedra, até à produção de pedra natural como produto final, incluindo todos os movimentos de transporte que, sendo matérias de elevada densidade, implicam consumos consideráveis de energia, o que representa atualmente quantidades significativas de gásóleo [4].

Um dos principais impactos do setor para o ambiente é a emissão de CO<sub>2</sub>, principalmente associada ao elevado consumo de energia, com particular destaque para o consumo de combustíveis fósseis. Conforme representado na Figura 4.13, a energia utilizada no processo de extração e transformação da pedra natural encontra-se dividida pelas seguintes fases:

1. A energia consumida na fase de extração;
2. Transporte da pedra para as unidades de transformação da pedra e destas para o local de utilização;
3. A fase de corte e preparação do produto final.





► Figura 4.13. Utilização de energia atual e perspectivas de utilização futuras.

Grande parte da energia consumida na fase de transformação da pedra é obtida através da eletricidade, contudo na fase extrativa e de transporte existe uma elevada dependência dos combustíveis fósseis, com especial incidência nos produtos obtidos a partir do petróleo, como é o caso do gasóleo.

Enquanto a energia requerida para a extração, não apresenta variações muito significativas, a energia associada ao transporte pode variar de forma considerável, em função da distância entre a pedreira e a zona de processamento. O transporte de pedra pode corresponder a consumos muito significativos de energia, principalmente quando esse trans-

porte de matéria-prima implica deslocações de algumas dezenas de quilómetros [4].

O setor da pedra natural tem vindo a demonstrar a capacidade para implementar e utilizar processos que permitem reduzir a produção de resíduos e a diminuir significativamente o consumo de energia. Neste contexto, a utilização de combustíveis sintéticos aliada à melhoria da eficiência dos processos contribuirá para reduzir o impacto ambiental e as emissões de CO<sub>2</sub> do setor [5].

### Alternativas sustentáveis para o consumo de energia no setor

Uma das alternativas apontada pela União Europeia é a aposta em veículos elétricos, contudo, a substituição de máquinas e veículos a gasóleo, por outros com baterias e motores elétricos, pode ser complexo, dispendioso e arriscado. Esta dificuldade resulta de um conjunto de fatores como sejam:

- A localização de pedreiras em locais mais remotos, onde a rede elétrica, com características que possibilitem os carregamentos das baterias não está acessível;
- A necessidade de que os veículos e máquinas já

muito grandes e muito pesadas, sejam carregadas ainda com uma elevada quantidade de baterias que possibilitem assegurar uma normal operação;

- A utilização de máquinas e veículos em condições que são caracterizadas por muita poeira, sujeitos a pancadas fortes e em zonas remotas, não oferece as melhores condições para o funcionamento destes equipamentos com propulsão elétrica;

- A necessidade de grandes investimentos para poder proceder à substituição dos equipamentos, em contraponto com a possibilidade oferecida pelos combustíveis renováveis para manter os atuais veículos e máquinas equipados com motores de combustão interna.

Perante estas condições, a necessidade de encontrar soluções que contribuam para a descarbonização, torna os biocombustíveis, numa perspetiva de curto prazo e os combustíveis sintéticos, numa perspetiva de médio/longo prazo, demonstrando serem recursos com elevado potencial.

## Os combustíveis sintéticos

Os combustíveis sintéticos desempenham um papel crucial nos esforços de descarbonização dos setores onde é requerida alguma mobilidade, como é exemplo o caso dos transportes e das máquinas de extração, utilizadas na indústria da pedra natural. Isto deve-se fundamentalmente à possibilidade de poderem ser produzidos a partir de fontes de energia renováveis, e o que reduz potencialmente as emissões de gases com efeito de estufa quando utilizados em motores de combustão interna como fonte de energia, em substituição dos combustíveis fósseis tradicionais. Neste contexto, apresentam a vantagem de serem compatíveis com as infraestruturas e os veículos existentes, o que os torna ainda mais vantajosos nesta solução de transição para um futuro energético mais sustentável [6].

A produção de combustíveis sintéticos normalmente envolve a transformação de recursos renováveis, como a biomassa vegetal ou animal ou mesmo resíduos industriais ou domésticos, em produtos que permitem a portabilidade da energia, utilizan-

do diferentes métodos, como é o caso da síntese *Fischer-Tropsch* (FT) para hidrocarbonetos líquidos.

Os combustíveis sintéticos semelhantes ao gasóleo têm qualidades que os tornam uma alternativa apelativa aos combustíveis fósseis tradicionais. Fatores como o número de cetano (forma de medir a capacidade do combustível para inflamar) e a densidade energética, são característicos essenciais que permitem garantir a utilização e a operacionalidade funcional do setor, sem implicar mudanças significativas. Estes combustíveis podem ser produzidos a partir de várias matérias-primas, como por exemplo, os processos de biomassa para líquido (BTL), que convertem materiais orgânicos como resíduos agrícolas, resíduos florestais e algas em gasóleo sintético, ou como os processos de gás para líquido (GTL) que transformam o gás natural em gasóleo sintético.

Estes combustíveis sintéticos, também denominados *synfuels*, são combustíveis líquidos ou gaso-

so sintetizados através de processos químicos que utilizam materiais como o CO<sub>2</sub>, a água e fontes de energia sustentáveis como a energia eólica ou solar.

São concebidos para reproduzir as qualidades e o conteúdo energético dos combustíveis fósseis normais, como a gasolina, o gasóleo ou o gás natural. Exemplos comuns de combustíveis sintéticos incluem o hidrogénio, a gasolina sintética, o gasóleo sintético, e o gás natural sintético.

Uma outra possibilidade é a utilização da eletrólise, realizada com recurso a eletricidade obtida a partir de fontes renováveis, para a produção de hidrogénio que poderá posteriormente ser combinado com carbono, capturado a partir de processos de combustão ou retirado da atmosfera. Este tipo de combustíveis sintéticos, em contraponto aos anteriores, muitas vezes são referidos como *e-fuels*.

Existem várias tecnologias que permitem a captura e utilização de carbono, como é exemplo a captura pós-combustão, contribuindo de forma significativa para a redução das emissões de CO<sub>2</sub>, fundamentalmente porque impedem a emissão de dióxido de carbono para a atmosfera, permitindo a sua reutilização novamente após conversão em hidrocarbonetos. A captura pós-combustão, envolve a recolha das emissões de CO<sub>2</sub> após a queima de combustíveis fósseis em locais de elevado consumo de energia com recurso à combustão. Neste processo, os gases de escape, que contêm CO<sub>2</sub>, são recolhidos e passados através de um solvente que captura seletivamente o dióxido de carbono.

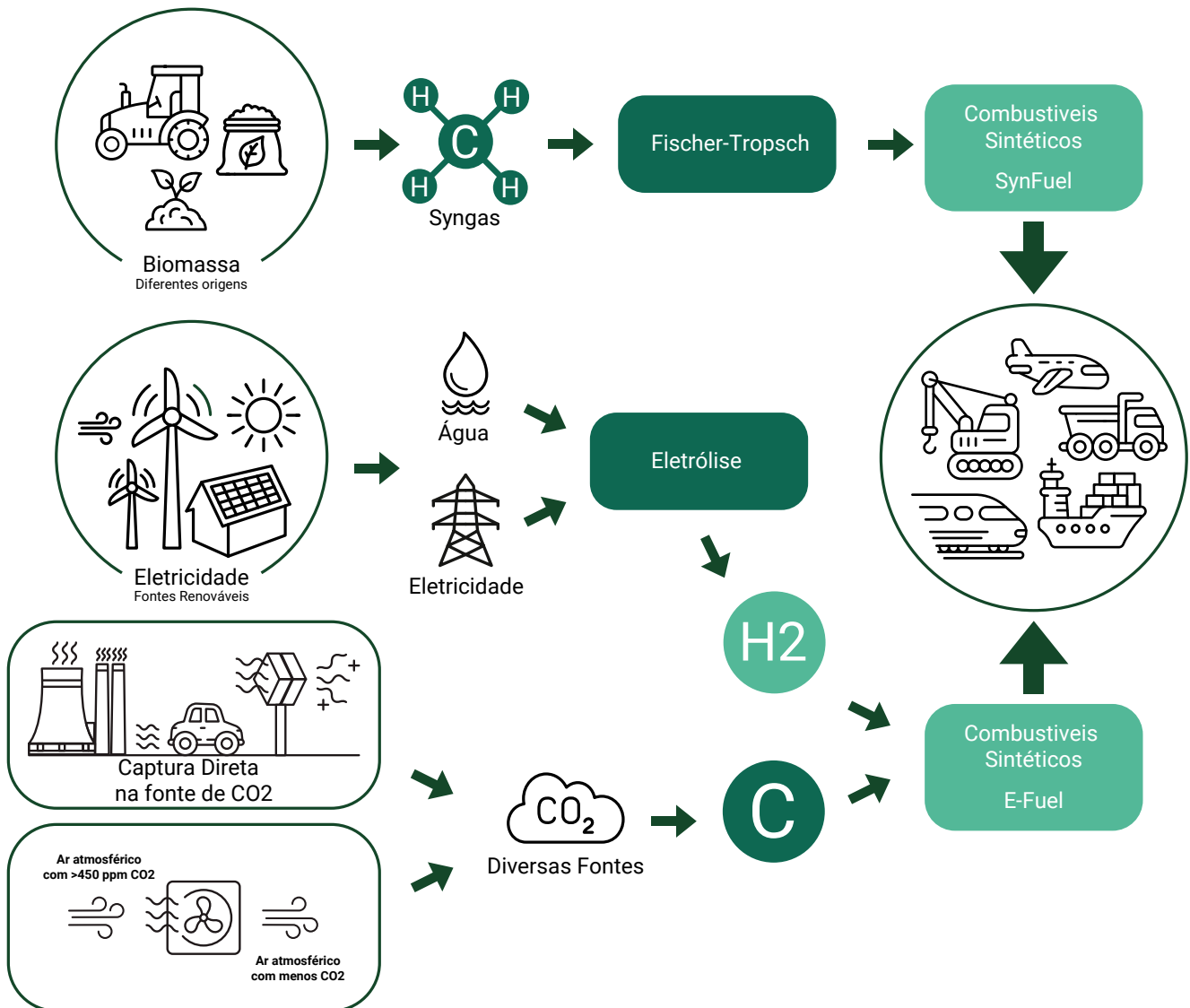
Outra forma de obter o carbono é através da captura do CO<sub>2</sub> a partir da atmosfera, porque ao retirar dióxido de carbono que já existe na atmosfera, torna-se possível conjugá-lo com o hidrogénio obtido

através da eletrólise, convertendo-o num combustível com características semelhantes aos combustíveis de origem fóssil.

A captura de dióxido de carbono da atmosfera implica a passagem de grandes quantidades de ar de onde possa ser extraído esse CO<sub>2</sub>. Este processo é pouco eficiente, dado que, por cada 100 litros de ar atmosférico processado, apenas se consegue obter entre 0,2 e 0,3 litros de CO<sub>2</sub>, assumindo uma concentração de aproximadamente 450 ppm de CO<sub>2</sub> e dependendo da eficácia do processo de retenção desse CO<sub>2</sub>. De modo a poder obter quantidades significativas de dióxido de carbono, é necessário processar enormes quantidades de ar, o que implica um elevado consumo energético no processo de ventilação.

O CO<sub>2</sub> obtido através dos processos de captura de carbono é combinado com hidrogénio para produzir combustíveis de hidrocarbonetos sintéticos, como a gasolina sintética ou o gás natural sintético, ou mesmo o gasóleo sintético. Esta abordagem, não só reduz as emissões de gases com efeito de estufa, retendo o CO<sub>2</sub> e evitando a sua presença na atmosfera, como também contribui para a criação de combustíveis mais limpos, neutros ou mesmo negativos em termos de carbono.

Na Figura 4.14 é apresentado um esquema que ilustra os caminhos associados ao possível processamento de combustíveis sintéticos e que possibilitam a sua utilização nos equipamentos e veículos utilizados na extração e transporte de pedra natural.



► Figura 4.14. Processo de produção de combustíveis sintéticos.

Para os combustíveis com uma elevada percentagem de eletricidade no processo de produção, o termo eletrocombustível (*e-fuels*) pode ser utilizado, sendo ainda possível que estes combustíveis sejam identificados com a abreviatura xTE. Para os combustíveis sintéticos convencionais, que se baseiam na síntese *Fischer-Tropsch*, a terminologia xTL é comum. Os termos devem ainda ser divididos em combustível sintético renovável para combustíveis produzidos a partir de matéria-prima renovável e combustíveis sintéticos fósseis para combustíveis produzidos a partir de matéria-prima fóssil. O termo *e-fuel* deve ser utilizado apenas nos casos em que tanto a eletricidade como o carbono são obtidos a partir de fontes de energia renováveis [7].

A utilização de combustíveis sintéticos no processo de extração e transporte tem a grande vantagem de permitir manter todo o processo e todos os equi-

pamentos tal como têm vindo a ser utilizados nas últimas décadas, permitindo uma transição para um processo sustentável de funcionamento com reduzidos ou mesmo nenhuns impactos na operação. Os principais obstáculos para que esta solução seja implementada, reside na escassez de recursos para a produção dos combustíveis e, sobretudo, no seu elevado preço final. Existe ainda um outro fator, que tem a ver com alguma imaturidade da tecnologia, mas esse problema será resolvido à medida a que forem sendo feitos investimentos nestas soluções que permitam o seu desenvolvimento.

## Conclusão

Pode referir-se que a descarbonização do setor da pedra natural terá obrigatoriamente de considerar potenciais soluções que permitam substituir o consumo de gasóleo dos equipamentos utilizados na extração e dos veículos utilizados no transporte.

Apesar de haver ainda um longo caminho a percorrer, a utilização de combustíveis sintéticos permite oferecer condições para que essa descarbonização possa ocorrer, através da substituição do combustível de origem fóssil por combustível sintético renovável, sem implicações para a operação, permitindo, inclusivamente, manter os equipamentos e veículos, havendo apenas alteração no produto que será colocado nos depósitos de combustível.

Os combustíveis sintéticos podem ser obtidos através do processo de eletrólise e captura de carbono, permitindo obter os *e-fuels*, ou através do processo de síntese, originando os *synfuels*, utilizando como recurso diferentes resíduos provenientes de diversas origens, sejam industriais, domésticos ou agrícolas. Os combustíveis obtidos desta forma, podem ter diferentes arranjos moleculares, de acordo com as necessidades, oferecendo características muito similares às dos combustíveis fósseis, nomeadamente uma grande densidade energética e elevada inflamabilidade.

A transição para estes combustíveis sintéticos necessita de ser feita de modo sustentado, quer pelo

elevado preço que estes produtos ainda têm, quer pela reduzida capacidade produtiva. Ao longo dos próximos anos, caso seja possível manter máquinas e veículos equipados com motores de combustão interna, os combustíveis sintéticos serão alvo de novos investimentos e de maior desenvolvi-

mento, permitindo posicionar-se como uma efetiva solução para os vários setores industriais, possibilitando garantir a sustentabilidade destas áreas, nomeadamente na indústria do setor da pedra natural.

#### 4.4.3. Gases renováveis

O hidrogénio verde e o amoníaco verde podem ser utilizados em diferentes operações no setor da pedra natural, atuando como vetores estratégicos da descarbonização. Para além de poderem ser utiliza-

dos como matéria-prima, na produção de combustíveis sintéticos, também atuar como combustível direto, ou como meio de armazenamento e transporte do hidrogénio.

#### Hidrogénio verde

O hidrogénio verde, produzido a partir da eletrólise da água utilizando fontes de energia renováveis, surge como uma alternativa renovável promissora à substituição de combustíveis fósseis, podendo ser usado em motores de combustão interna em combinação com o gasóleo. A adição controlada de hidrogénio melhora a eficiência, reduz as emissões e mantém a funcionalidade dos motores existentes. Apesar do potencial do hidrogénio, a sua

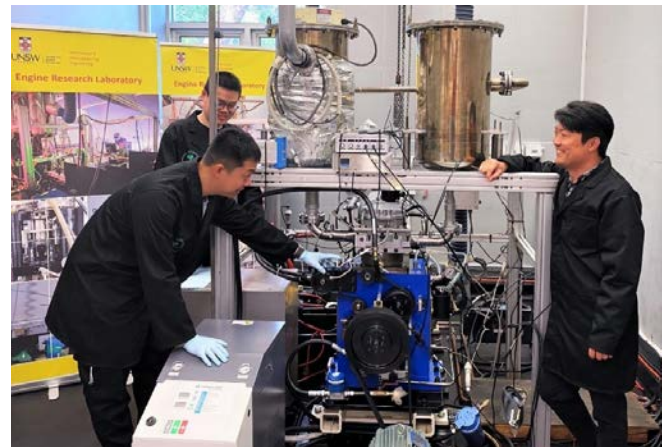
produção enfrenta desafios, associados ao custo, segurança, disponibilidade, e necessidade de infraestruturas de armazenamento adequadas que limitam a implementação da tecnologia. A sua utilização, ultrapassados estes desafios, representa uma solução realista, escalável e compatível com a maquinaria atual, permitindo acelerar a transição energética no setor extrativo rumo às metas climáticas para 2050.

### Caso de aplicação

Nos últimos anos, têm sido desenvolvidos vários projetos demonstradores que utilizam o hidrogénio como combustível, em motores de combustão interna. Na Universidade de Nova Gales do Sul, Austrália, foi desenvolvida uma tecnologia patenteada que mistura hidrogénio e gasóleo em motores adaptados, otimizado a injeção da mistura para evitar a combustão descontrolada e reduzir as emissões de NOx [8]. Os resultados obtidos revelaram-se promissores. O uso de uma mistura 90% hidrogénio:10% gasóleo, resultou numa redução

de emissões de CO<sub>2</sub> acima dos 85% e no aumento de eficiência em cerca de 13% (quando comparado com motor gasóleo. Um dos principais aspetos diferenciadores desta abordagem é a facilidade de implementação em motores a gasóleo já existentes. Trata-se de uma solução flexível, pois, em caso de escassez ou indisponibilidade de hidrogénio, os motores podem funcionar com misturas menos enriquecidas em H<sup>2</sup> ou apenas com gasóleo, como antes da adaptação.

- Figura 4.15. Motor de combustão interna a diesel modificado para funcionar com mistura hidrogénio: gasóleo (Fonte: *University of New South Wales*) [9].



### Amoníaco verde

O amoníaco verde, produzido a partir de hidrogénio verde e do azoto do ar, tem sido apontado como uma alternativa promissora para a descarbonização da indústria. Pode ser utilizado como combustível, isento de emissões de carbono, ou como meio de armazenar e transportar hidrogénio de forma mais eficiente, graças à sua maior densidade energética volumétrica, a condições de armazenamento mais favoráveis em comparação com o hidrogénio

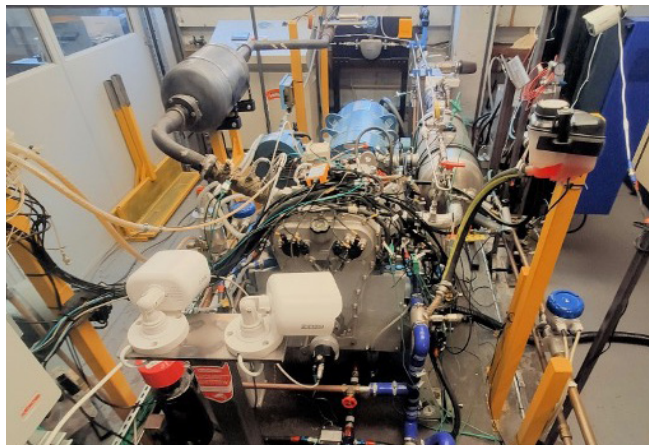
e à existência de uma infraestrutura já estabelecida para produção, transporte e utilização. O mercado de amoníaco enquanto combustível encontra-se numa fase embrionária. No entanto, o investimento em amoníaco tem vindo a crescer, com previsões a indicar que a utilização de amoníaco como combustível representará 4% da procura global de amoníaco até 2030 e 29% até 2050 [10].

### Caso de aplicação

Em 2022, foi lançado um projeto, desenvolvido pela empresa alemã, MAHLE Powertrain em parceria com a Universidade de Nottingham e financiado pelo Governo do Reino Unido, com o objetivo de desenvolver tecnologias que permitam a substituição do gásóleo por combustíveis hipocarbônicos, como o amoníaco, em motores de combustão de elevada potência [11], [12]. O projeto foca-se no desenvolvimento de motores para serem utilizados nos

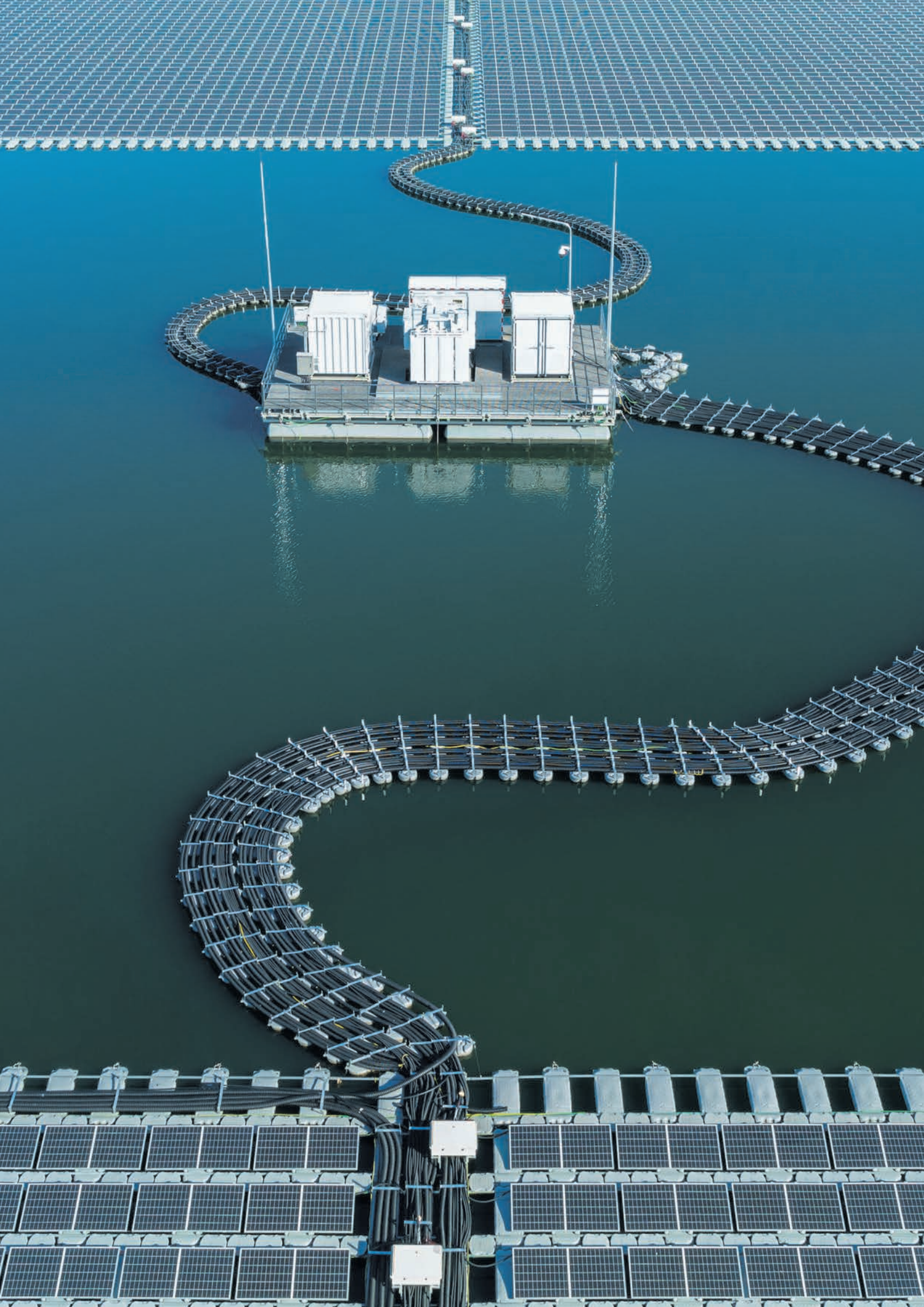
setores da mineração, extração e construção, responsáveis por cerca de 15% do consumo total de gásóleo do Reino Unido. As estratégias desenvolvidas incluíram o retrofit de motores de gásóleo existentes e a implementação de uma nova tecnologia, que aumenta a velocidade combustão, garantindo um processo mais limpo e eficiente, e reduzindo as emissões de NOx.

- Figura 4.16. Motor experimental a amoníaco na Universidade de Nottingham, Reino Unido, um dos parceiros da MAHLE Powertrain para substituição do gásóleo [4], [5].



## Referências

- [1]. ADENE - Agência para a Energia, "Energias em Números - Edição 2024," Observatório da Energia, 2024.
- [2]. DGEG, "Energia em Portugal - Principais números 2023," 2025.
- [3]. B. Alqadi, D. Alamleh, I. N. Eldin e H. N. Eldin, "A comparative life cycle energy and greenhouse emissions of natural and artificial stone-manufacturing phase," *Results in Engineering*, vol. 18, p. 101055, 2023. [Online]. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2023.101055>
- [4]. H. R. Klunter, "The implementation of circular economy in the Portuguese natural stone sector," 2020. [Online]. Disponível em: <https://repositorio.iscte-iul.pt/handle/10071/21446>
- [5]. J. Benajes, A. Garcia, J. Monsalve-Serrano e M. G. Mendoza, "A review on low carbon fuels for road vehicles: The good, the bad and the energy potential for the transport sector," *Fuel*, vol. 361, p. 130647, 2024. [Online]. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2023.130647>
- [6]. I. Ridjan, B. V. Mathiesen e D. Connolly, "Terminology used for renewable liquid and gaseous fuels based on the conversion of electricity: a review," *J. Clean. Prod.*, vol. 112, pp. 3709–3720, 2016. [Online]. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.05.117>
- [7]. República Portuguesa, Resolução do Conselho de Ministros n.º 149/2024, de 30 de outubro, Diário da República, 1.ª série, n.º 211, 2024. [Online]. Disponível em: <https://diariodarepublica.pt/dr/detalhe/resolucao-conselho-ministros/149-2024-893982647>
- [8]. X. Liu, G. Seberry, S. Kook, Q. N. Chan e E. R. Hawkes, "Direct injection of hydrogen main fuel and diesel pilot fuel in a retrofitted single-cylinder compression ignition engine," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 47, no. 84, pp. 35864–35876, 2022. [Online]. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.08.149>
- [9]. University of New South Wales, "New system retrofits diesel engines to run on 90 per cent hydrogen," UNSW. [Online]. Disponível em: <https://www.unsw.edu.au/newsroom/news/2022/10/new-system-retrofits-diesel-engines-to-run-on-90-per-cent-hydrogen>
- [10]. S&P Global Commodity Insights, "Unpacking ammonia's market landscape and its role in the energy transition," S&P Global, 16 Sep 2022. [Online]. Disponível em: <https://www.spglobal.com/commodityinsights/en/market-insights/blogs/energy-transition/091622-ammonia-prices-supply-demand-hydrogen-power-bunker-fuel>
- [11]. MAHLE Powertrain, "MAHLE Powertrain drives the development of ammonia combustion for heavy duty engines," MAHLE Powertrain. [Online]. Disponível em: <https://www.mahle-powertrain.com/en/news-and-press/press-releases/mahle-powertrain-drives-the-development-of-ammonia-combustion-for-heavy-duty-engines-91713>
- [12]. Ammonia Energy Association, "Ammonia solutions for the UK construction industry," Ammonia Energy. [Online]. Disponível em: <https://ammoniaenergy.org/articles/ammonia-solutions-for-the-uk-construction-industry/>



## 4.5. Digitalização

A extração de pedra natural tem um impacto ambiental inferior ao de outros materiais, mas continua a gerar emissões significativas de CO<sub>2</sub> devido ao uso intensivo de gasóleo, na maquinaria pesada e no transporte. Alinhar o setor com os objetivos de descarbonização nacionais e europeus exige a substituição progressiva do gasóleo por alternati-

vas mais sustentáveis, como os biocombustíveis, combustíveis sintéticos ou gases renováveis, que permitem reduzir as emissões sem comprometer a eficiência operacional, cumprindo com os critérios de sustentabilidade previstos na diretiva RED (*Renewable Energy Directive*).

### 4.5.1. A digitalização e a inovação tecnológica para otimização de processos industriais e capacitação de profissionais na descarbonização da pedra natural

Frederico Sousa Cardoso

STONECITI | Rede Europeia de Pólos de Inovação Digital - EDIH

#### Introdução

A adoção de tecnologias digitais e o recurso a mecanismos facilitadores da sua implementação têm assumido um papel central na agenda da Transição Verde e Digital. Na Europa e em Portugal, torna-se particularmente relevante analisar a representatividade das empresas que integram estas tecnologias nos seus processos, aferir a intensidade e a maturidade digital e identificar os principais desafios a superar, com vista a reforçar a capacidade de desenvolvimento e competitividade futura das empresas, em particular no setor da pedra natural.

No atual contexto de crescente digitalização da economia e da sociedade, torna-se crucial assegurar o reforço das competências digitais dos trabalhadores, enquanto alavanca fundamental para a inovação, a produtividade e a competitividade nacional. Neste enquadramento, já existem estudos que procederam à análise do desempenho de Portugal, com especial enfoque nos indicadores de competências digitais, conforme definidos pelo Índice de Digitalidade da Economia e da So-

cidade (IDES) [1] e por outras métricas europeias de referência, como os questionários diagnósticos de maturidade digital, pelos quais os *European Digital Innovation Hubs* (EDIH) são responsáveis por implementar a PMEs e à Administração Pública (AP) em todo o território nacional. Esta avaliação com base em diagnóstico visa apoiar a definição de políticas públicas e de ações estratégicas que promovam a capacitação digital, contribuindo para o alinhamento do País com os objetivos da Década Digital da União Europeia e do Plano de Ação para a Transição Verde e Digital. [2]

A disponibilização de infraestruturas de conectividade digital fiáveis, de elevada qualidade e com cobertura abrangente constitui um requisito estruturante para assegurar a inclusão digital e fomentar a transformação digital do tecido empresarial. Neste contexto, à semelhança das competências digitais já existe um estudo sobre o estado da conectividade em Portugal, avaliando-se o seu impacto na competitividade nacional, a par dos principais

constrangimentos técnicos, territoriais e económicos. Estes tipos de decisões querem-se informadas para suportar e apoiar a definição de políticas e investimentos estratégicos orientados para a mitigação das assimetrias existentes, a promoção da coesão territorial e o reforço da maturidade digital do País.

Por sua vez os instrumentos de política pública, como os apoios à captação/procura de investimento ou os apoios à Transição Digital (TD), têm desempenhado um papel estratégico no desenvolvimento da resiliência digital e na capacidade ino-

vativa das empresas, nomeadamente em domínios de elevada prioridade como a TD. Impõe-se uma correta gestão e uma avaliação rigorosa do impacto destes apoios no reforço da digitalização do tecido económico português, em particular no setor da pedra natural, com vista à identificação de fatores críticos de sucesso, boas práticas passíveis de sistematização, bem como de subáreas suscetíveis de otimização. Este contributo é essencial para o alinhamento dos instrumentos existentes com as necessidades emergentes da economia digital.

### A Digitalização centrada na indústria e no ser humano, da União Europeia a Portugal.

Ao nível das empresas a implementação de novas tecnologias tem sido um dos principais focos da Transição Digital (TD), uma vez que permite às empresas ganhar vantagem competitiva, melhorar os seus serviços e produtos e expandir os seus mercados. O aumento do uso das tecnologias digitais torna crescente a necessidade de formação e capacitação de funcionários e quadros técnicos com competências digitais básicas e avançadas mais aprofundadas e adequadas, de forma a garantir que o próprio mercado de trabalho acompanhe o ritmo da transformação tecnológica e digital. No contexto económico, representam fatores críticos para o incentivo à inovação, aumento da produtividade e reforço da competitividade das empresas. Para uma aceitável e melhor integração de novas tecnologias nas empresas extrativas e/ou transformadoras, é importante assegurar que dispõem de infraestruturas de conectividade digital de alto desempenho, seguras, sustentáveis e de fácil acesso a prestadores de serviços digitais, permitindo a evolução e a utilização de novas tecnologias a

preços mais competitivos. No futuro, estas serão ações e investimentos que poderão assumir um papel diferenciador e preponderante na resiliência do tecido económico, principalmente para mercados exportadores. Antevendo-se um impacto a longo prazo positivo na economia para quem aposte na inovação enquanto motor do desenvolvimento futuro e sustentável do serviço ou produto em causa.

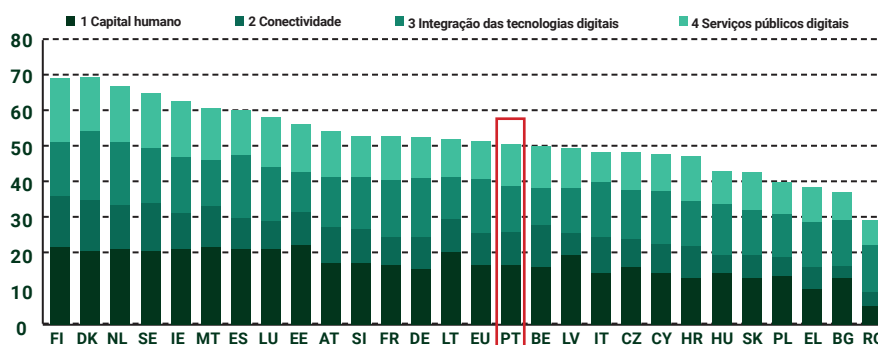
O caminho que tem vindo a ser feito ao longo das últimas décadas com vista ao incremento do vetor inovação nas empresas é assente na sua maioria em mecanismos de suporte e auxílios estatais. Estes apoios públicos desempenham ainda aos dias de hoje um importante papel no desenvolvimento económico e um fator de sucesso para a aceleração da TD do País.

A Comissão Europeia tem vindo a acompanhar o progresso digital dos Estados-Membros através dos relatórios do Índice de Digitalidade da Economia e da Sociedade (IDES). O IDES classifica os

Estados-Membros em função do seu nível de digitalização e analisa os progressos relativos realizados nos últimos cinco anos, tendo conta o seu ponto de partida. [1], [3]

Apesar de progressos já registados, a digitalização na União Europeia (UE) continua a apresentar assimetrias significativas entre Estados-Membros, ainda que se observem sinais encorajadores de convergência. Embora os países mais avançados se mantenham na vanguarda, um número crescente de Estados-Membros apresenta níveis de digitalização próximos da média europeia. Destacam-se, em particular, que a maioria dos países que, há cinco anos, evidenciavam níveis reduzidos de maturidade digital têm vindo a registar taxas de progresso mais acentuadas, o que aponta para uma tendência positiva de convergência digital à escala europeia.

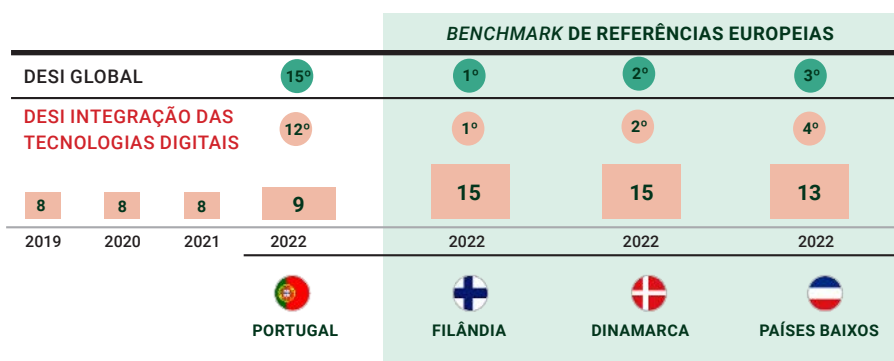
A concretização das metas estabelecidas para a Década Digital da UE exige um compromisso coletivo e sustentado. Cada Estado-Membro deverá contribuir a partir de uma base diferenciada, determinada por fatores estruturais como os recursos disponíveis, as vantagens competitivas específicas, a dimensão populacional, a escala económica e os setores de especialização. Neste contexto, os Estados-Membros com maiores economias e populações terão um papel determinante na prossecução dos objetivos globais europeus até 2030. Simultaneamente, os líderes digitais devem continuar a investir e a inovar para garantir a liderança europeia no panorama digital global, reconhecendo que as estratégias nacionais de digitalização devem refletir as prioridades económicas e sociais de cada país.



► Figura 4.17. Classificações do Índice de Digitalidade da Economia e da Sociedade (IDES) de 2022. Retirado do documento final da Comissão Europeia IDES 2022, Portugal.

Em termos globais nacionais de desempenho IDES o número de empresas que implementam tecnologias inovadoras e digitais em Portugal é considerado baixo e ligeiramente inferior ao de países homólogos, pelo que existe margem de aceleração e crescimento, tendo Portugal obtido uma classificação global de 9 valores num total de 25 valores. Portugal ocupa o 15º lugar entre os 27 Estados-Membros da UE na edição de 2022 do IDES Global e ocupa o 12º lugar no IDES para a integração das tecnologias digitais. Com destaque ainda para os seguintes números: em Portugal, 91.2%

das grandes empresas utilizam um ERP, enquanto apenas 50.8% das PME fazem uso desta tecnologia; em Portugal, 53.9% das grandes empresas utilizam CRM, enquanto apenas 24.4% das PME fazem uso desta tecnologia; utilização de *Cloud* – *Target* (75%), Portugal 34.7%; utilização de *Big Data* – *Target* (75%), Portugal 10.6%; e utilização de *IA* – *Target* (75%), Portugal 17.3%. Estes números revelam que o número de empresas que implementam a maior parte das tecnologias em Portugal ainda é reduzido, mas com margem para significativa melhoria. [1]



► Figura 4.18. IDES global e posição relativa de Portugal tendo em conta os países líderes da União Europeia. Retirado do documento final da avaliação do potencial económico da TD em Portugal.

A dimensão digital, onde se inclui a digitalização da indústria e da administração pública, representa cerca de 22% do montante global do Plano de Recuperação e Resiliência (PRR) português. Este plano para a transição digital integra um conjunto de medidas estruturantes, com destaque para três eixos prioritários: i) a promoção da educação e da formação em competências digitais; ii) a transformação digital do tecido empresarial; e iii) a digitalização da Administração Pública, encarada como um instrumento catalisador para a sustentabilidade das finanças públicas, a melhoria do ambiente de

negócios e o aumento da eficiência administrativa. Estas medidas estão alinhadas com as prioridades estratégicas de Portugal na área digital, abordando dimensões estruturais do sistema socioeconómico nacional, com um horizonte de atuação a médio e longo prazo. Entre as iniciativas implementadas, destacam-se a celebração de contratos para a aquisição de equipamentos informáticos e industriais destinados a empresas de todos os setores, onde se inclui a extração de pedra natural e transformação de produtos de pedra natural. Na prática esta dimensão digital reflete-se nos dezassete pólos de

inovação digital (DIH), dos quais três também têm o reconhecimento europeu como EDIH, para prestar serviços de consultoria a diversos setores, onde se enquadra a pedra natural, a fim de melhorar os seus processos de produção através da automatização p.e., ou da incorporação de novas tecnologias mais emergentes e disruptivas.

Para o setor da pedra natural, o pólo de inovação com melhor enquadramento será o DIGITALbuilt, representado pelo StoneCITI, e que disponibiliza tecnologias avançadas ao serviço da modernização do setor. Adiante, em “Soluções inovadoras e competências digitais para recursos humanos” iremos apresentar o tipo de soluções que o Pólo pode disponibilizar, e como estas podem contribuir para a redução de emissões de carbono na indústria enquadrando-se neste Roteiro para a Neutralidade Carbónica 2050 do setor da pedra natural. Globalmente, as atividades do Pólo estão organizadas em quatro pilares fundamentais:

1. Criação de competências digitais e qualificação com programas de formação para capacitar os recursos humanos das empresas;
2. Ecossistema de inovação entre empresas com centros de investigação, start-ups e fornecedores de tecnologia. Promovendo a partilha de conhecimento e cooperação;
3. Apoio à captação de investimento;
4. Serviços *test-before-invest*. Elevado incentivo à possibilidade de experimentar novas soluções tecnológicas antes da sua implementação (investimento), reduzindo-se riscos e promovendo decisões mais informadas.

### A transformação digital nas empresas portuguesas: uma abordagem *step by step*.

A avaliação do atual posicionamento das empresas face à transformação digital pode ser realizada através da aplicação de inquéritos específicos, concebidos para recolher informação que permita diagnosticar o grau de maturidade digital e delinear estratégias de apoio adequadas. Estes inquéritos seguem uma metodologia estruturada, iniciando-se com a identificação de um universo-alvo de empresas e da pessoa responsável pelas decisões de investimento e respetivo financiamento — tipicamente a gerência ou a administração. Posteriormente, procede-se à fase de trabalho de campo, que compreende a realização de entrevistas e a constituição de uma amostra tão representativa

quanto possível, assegurando a recolha sistematizada dos dados necessários à análise. A recolha de informação para aferir o grau de maturidade digital das empresas portuguesas é feita com base, no nível de conhecimento das tecnologias associadas à transição digital; no perfil digital dos colaboradores, trabalho remoto, com recurso a software e sistemas de informação e com conhecimentos ou formação em tecnologias de informação (TI); na implementação de tecnologias digitais na empresa; e na digitalização dos processos da empresa e na sua relação com clientes e fornecedores. A recolha de dados terá ainda em consideração as principais oportunidades e desafios à transformação

digital das empresas, que podem ir desde a identificação das prioridades estratégicas ao nível da transformação digital; o conhecimento de incentivos/apoios públicos para promover a transformação digital; e a participação em ações ligadas a transformação digital promovidas por associações empresariais e parcerias com instituições de ensino superior para o desenvolvimento de programas de formação e qualificação avançada, bem como a sua implementação no dia-a-dia dos seus trabalhadores. A recolha de informação permite ainda apurar os principais bloqueios e barreiras à transformação digital das empresas. Permitindo antever alguns estímulos e motivações necessárias à melhoria da jornada digital.

Numa amostra representativa de 359 empresas de 17 setores de atividade, a IPSOS APEME realizou um estudo sobre o grau de maturidade digital de onde é possível retirar algumas conclusões, como p.e., o grau de familiaridade com as tecnologias associadas à digitalização é, de um modo geral, baixa; cerca de um terço das empresas afirma que menos de 25% dos seus colaboradores utilizam softwares ou sistemas de informação e cerca de 1 em cada 5 não recrutou colaboradores com conhecimentos em TI; a desmaterialização dos processos de trabalho é a área em que as empresas mais têm investido, e observa-se que o setor das infraestruturas é quem mais passos deu neste processo; o setor primário, onde se inclui as indústrias extrativas, é o que revela menor utilização de meios e canais digitais na relação com clientes e fornecedores. Este estudo revela ainda que as principais barreiras identificadas à implementação de iniciativas de transformação digital são, maioritariamente, de natureza intrínseca às próprias empresas. Destacam-se, em particular, a dificuldade em conciliar a formação dos colaboradores com as exigências operacionais do tempo de trabalho, os desafios associados à reconfiguração dos modelos de negócio face à

integração de tecnologias digitais e a limitada adequação dos programas de apoio existentes às especificidades das empresas. Num segundo nível de estrangimentos, surgem obstáculos relacionados com o acesso a financiamento, a escassez de recursos humanos qualificados e as limitações ao nível da formação especializada. Conclui, que em geral o tecido empresarial português encontra-se, ainda, numa fase inicial do processo de transformação digital, evidenciando níveis reduzidos de maturidade digital e uma adoção limitada de tecnologias avançadas, o que reforça a necessidade de políticas públicas orientadas para o reforço da capacitação, da inovação e da competitividade digital. [4]

Para a pedra natural o StoneCITI promove junto das empresas a realização de diagnósticos de maturidade digital especialmente concessionados e desenvolvidos para o setor. A ferramenta de diagnóstico e análise da maturidade digital (DMA), utilizada no contexto da rede EDIH, visa analisar a maturidade digital das empresas. Tem como objetivo impulsionar o desenvolvimento do cliente, através da identificação do nível de maturidade digital, assim como de potenciais lacunas existentes nas seis dimensões digitais avaliadas. Através desta análise, é possível selecionar de entre diversas soluções altamente incentivadas, as que melhor se enquadram no perfil tecnológico da empresa.



► Figura 4.19. Quadro de avaliação das 6 dimensões da maturidade digital para micro, pequenas e médias empresas.

A estratégia de negócio digital destina-se a captar o estado geral da estratégia de digitalização da empresa do ponto de vista empresarial. Incidem sobre os investimentos da empresa na digitalização por áreas de negócio (executados ou previstos), bem como sobre a preparação para iniciar um percurso digital que pode exigir esforços organizacionais e económicos ainda não previstos.

A preparação digital fornece uma avaliação da atual adoção de tecnologias digitais (tanto tecnologias correntes como tecnologias mais avançadas)

válida tanto para a indústria extrativa e transformadora como para as empresas de serviços.

A digitalização centrada no ser humano analisa a forma como os funcionários são qualificados, envolvidos e capacitados com e por tecnologias digitais, e como são melhoradas as suas condições de trabalho, com vista a aumentar a respetiva produtividade e bem-estar.

A gestão de dados e conectividade capta a forma como os dados são armazenados digitalmente, or-

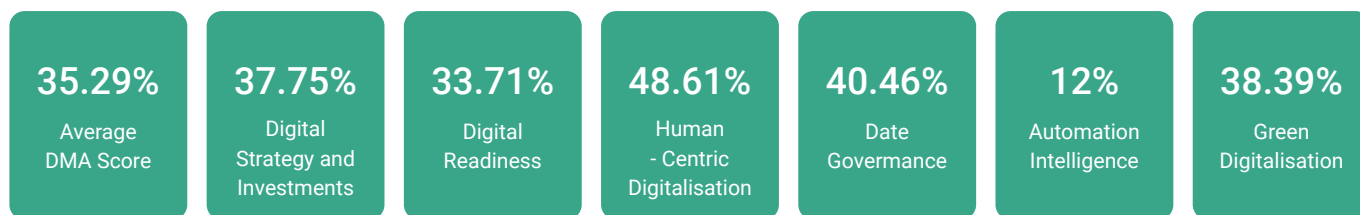
ganizados dentro da empresa, disponibilizados em dispositivos conectados e explorados para efeitos empresariais, tendo o cuidado de assegurar uma proteção de dados suficiente através de sistemas de cibersegurança.

A automação e inteligência artificial explora o nível de automação e inteligência facilitado pelos meios digitais, integrado nos processos empresariais.

E, por último, a digitalização ecológica que capta a

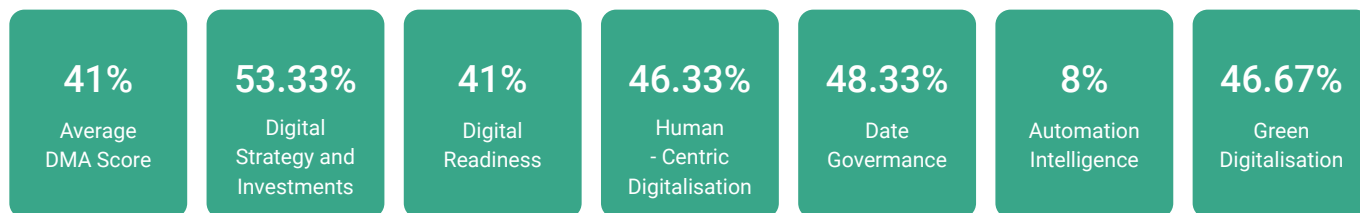
capacidade da empresa em realizar a digitalização com uma abordagem a longo prazo que assuma a responsabilidade e se preocupe com a proteção e sustentabilidade dos recursos naturais e capital natural.

Na rede *EDIH* estabeleceu-se um target de 399 empresas e uma amostra atual de 50 empresas (dados referentes até maio de 2025). Obtém-se os seguintes resultados para o Ambiente Construído (setores da construção, ferrovia e pedra natural).



► Figura 4.20. Resultados globais do Ambiente Construído (setores da construção, ferrovia e pedra natural) . 1

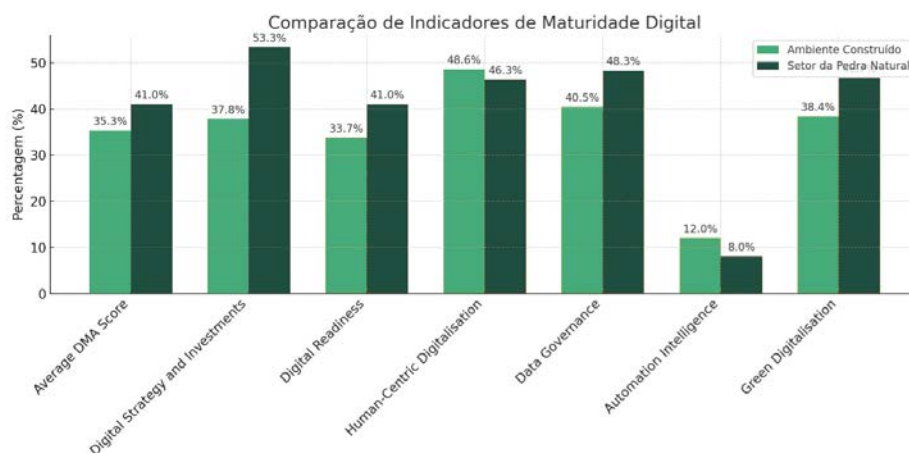
E os seguintes resultados para o setor da pedra natural.



► Figura 4.21. Resultados exclusivos do setor da pedra natural. 2

1 Origem dos dados EDIH DIGITALbuilt. Nota: Resultados preliminares

2 Origem dos dados EDIH DIGITALbuilt. Nota: Resultados preliminares



► Figura 4.22. Comparação de resultados globais do Ambiente Construído e resultados exclusivos da pedra natural. 3

Os resultados obtidos evidenciam a existência de diferenças entre os setores analisados, com o setor da pedra natural a demonstrar uma performance digital acima da média global do Ambiente Construído. Persistem, no entanto, desafios relevantes, nomeadamente na adoção de tecnologias de automação e inteligência artificial. Estes indicadores reforçam a importância de continuar a promover programas de capacitação digital, a adequação de

instrumentos de financiamento à realidade das empresas e o alinhamento das políticas públicas com as metas da Década Digital Europeia. A digitalização centrada nas pessoas, sustentada por dados de qualidade e orientada para a sustentabilidade, deve permanecer um pilar estratégico para acelerar a transformação dos setores produtivos nacionais.

### Soluções inovadoras e competências digitais para recursos humanos.

A transição para a neutralidade carbónica até 2050 constitui um dos pilares estruturantes da estratégia climática nacional, sendo essencial garantir o envolvimento de todos os setores económicos. O setor da pedra natural, pela sua relevância enquanto indústria extrativa e transformadora com forte

presença territorial, desempenha um papel significativo neste desígnio coletivo. Atingir a neutralidade carbónica exigirá um conjunto articulado de medidas estruturais e catalisadoras, com impacto direto sobre os processos produtivos, modelos de negócio, qualificações profissionais e instrumentos

3 Origem dos dados EDIH DIGITALbuilt. Nota: Resultados preliminares

financeiros. Neste contexto, destaca-se a necessidade de estimular a investigação, a inovação e a produção de conhecimento, promovendo a adoção de tecnologias de baixo carbono e a digitalização das operações, com vista à eficiência energética e à redução de emissões. A dinamização de uma nova economia orientada para a transição energética e para a descarbonização pressupõe o apoio à geração de novas oportunidades de investimento e emprego qualificado no setor da pedra natural. Alinhar os fluxos financeiros com os objetivos climáticos será igualmente crucial, fomentando mecanismos de financiamento sustentável e mobilizando o sistema financeiro para soluções alinhadas com a descarbonização da atividade.

Por fim, importa assegurar o desenvolvimento de competências e a requalificação profissional orientadas para as exigências da economia verde, garantindo que o setor está capacitado para responder aos desafios da neutralidade carbónica com soluções inovadoras, inclusivas e economicamente viáveis.

O Roteiro para a Neutralidade Carbónica 2050 (RNC2050) e a sua estratégia de longo prazo aplicada à economia portuguesa identifica como principais *drivers* de descarbonização: a maior eficiência energética e de recursos; a eletrificação; a energia solar e térmica; a inovação e novos modelos de negócio; e promoção de novas simbioses industriais, reaproveitamento de recursos e estratégias para a circularidade. [5]

As perspetivas, prioridades e caminhos para a aceleração digital sustentável e alinhadas com os objetivos do Roteiro, passam por:

1. Diagnóstico inicial, fidedigno e certificado da maturidade digital e tecnológica das empresas. O respetivo acompanhamento ao longo do tempo, registando os incrementos de maturidade e

os investimentos realizados. E promoção pela recolha de informação e dados de qualidade, que sustentem as tomadas de decisão futuras.

2. A implementação de sistemas de sensorização e IoT (Internet of Things) avançada de pedreiras e unidades industriais. Este constitui um vetor estratégico para a monitorização contínua e em tempo real de variáveis críticas ao longo da cadeia de valor, tanto na extração como na transformação da pedra natural. Estes sistemas incluem dispositivos, tipo sensores de pressão, temperatura, vibração, consumo energético, qualidade do ar, ruído e emissões difusas de partículas e CO<sub>2</sub>. Esta infraestrutura permite a recolha, a base de dados e o tratamento de dados operacionais para suportar decisões baseadas no conhecimento, melhorar a médio e longo prazo os impactos da produção, otimizar a manutenção preditiva e alinhar a operação com exigências de conformidade legal e ambiental.

3. O projeto digital integrado e a interoperação entre sistemas (ex. a digitalização e scanning de chapas de pedra natural). A incorporação de tecnologias de digitalização tridimensional (ex. scanners 3D, visão computacional e digitalização ótica de alta precisão) nas fases de acabamento e comercialização das chapas de pedra permite a criação de réplicas digitais (digital twins). Estes digital twins são integrados com software CAD/CAM e sistemas de design paramétrico, possibilitando o planeamento otimizado de cortes, personalização de encomendas e redução significativa de desperdícios de material. Esta abordagem promove a transição para fábricas inteligentes (smart factories), fomentando a interoperabilidade de sistemas.

4. A capacitação dos recursos humanos é um pilar fundamental. É necessário o desenvolvimento

de programas de formação contínua e requalificação técnica, com enfoque na digitalização industrial, eficiência energética, economia circular, sistemas de gestão ambiental e tecnologias emergentes. Estes programas devem ser adaptados às necessidades específicas das empresas do setor, e desenhados em articulação com centros de formação profissional, instituições do ensino superior e entidades do sistema científico e tecnológico, assegurando uma resposta estruturada às novas exigências de competências associadas à transformação dos modelos de negócio.

5. A eletrificação progressiva de equipamentos móveis e frotas internas constitui uma medida estruturante para a redução de emissões de gases com efeito de estufa (GEE). A substituição de máquinas convencionais a diesel por equipamentos também a diesel, mas mais eficientes energeticamente, elétricos, híbridos ou movidos a hidrogénio em operações de corte, movimentação de blocos e transporte interno permite reduzir significativamente a pegada carbónica das operações. Esta medida deve ser acompanhada por investimentos em infraestruturas de carregamento e integração com sistemas de gestão energética, garantindo a eficiência e a viabilidade técnica e económica da transição.
6. A instalação de sistemas de geração de energia a partir de fontes renováveis, nomeadamente fotovoltaica e solar térmica, representa uma medida-chave para a redução das emissões. Estes sistemas devem ser projetados para auto-consumo, aproveitando coberturas industriais, áreas adjacentes ou superfícies não produtivas. A energia gerada pode alimentar os consumos elétricos dos processos industriais (ex. serra-gem, corte, polimento e/ou resinagem, entre outros), contribuindo para a descarbonização e

para a resiliência face à volatilidade dos preços da energia.

7. A incorporação de princípios da economia circular na indústria da pedra natural deve traduzir-se na valorização de resíduos e subprodutos gerados ao longo do ciclo produtivo, como lamas de corte, poeiras e fragmentos de pedra. Estes materiais podem ser reintegrados em cadeias de valor alternativas (ex. indústria de cimentos, pavimentos, cerâmica, agregados reciclados) através de parcerias em simbioses industriais.
8. A otimização de processos com inteligência artificial e modelos preditivos com capacidade de serem descritivos. A aplicação de inteligência artificial (IA) e algoritmos de *machine learning* ao setor da pedra natural permite modelar, prever e otimizar o comportamento dos sistemas produtivos. Estas soluções podem ser integradas com plataformas de gestão da produção e gestão energética, proporcionando simulações operacionais, deteção precoce de ineficiências, previsão de avarias e ajustamento dinâmico da produção em função de variáveis externas (como o preço da energia). Esta abordagem assegura uma operação mais resiliente, adaptável e com potencial menor intensidade carbónica.

Em termos de competências digitais será evidente que empresas com recursos especializados em TI (ou áreas equivalentes), cujos conhecimentos sejam aplicados à otimização de processos industriais, apresentem uma vantagem competitiva e um potencial para a produtividade média ser superior. O papel essencial das TI (ou áreas equivalentes) passa também por:

1. Priorizar o reforço da literacia e das competências digitais, promovendo a qualificação e o em-

- prego no setor, com vista ao alinhamento entre as necessidades do mercado e a oferta formativa.
2. Fomentar a inclusão ativa de jovens e de mulheres em processo de requalificação ou reintegração no mercado de trabalho no setor, através do desenvolvimento e disponibilização de recursos formativos baseados na Web, metodologias de aprendizagem digital “gamificada” e aproveitamento estruturado das redes sociais enquanto plataformas de capacitação e *engagement* profissional.
  3. Desenvolver uma plataforma pedagógica digital orientada para a capacitação dos consumidores no uso crítico, seguro e informado das novas tecnologias e/ou novos produtos de pedra natural. Associadas aos meios de comunicação social, promovendo competências em literacia digital e combate à desinformação.
- Desenvolvimento de programas específicos de formação avançada para profissionais. Com foco na sustentabilidade, gestão de recursos e otimização de processos industriais.

### Orientações estratégicas para o futuro digital do setor no âmbito do RNC2050.

- I. Investigação, inovação e implementação de novas tecnologias digitais. Fomentar programas de incentivo à experimentação por via dos *EDIH*.
- II. Sensibilização das lideranças das PMEs para a TD e facilitação no acesso a apoios a nível nacional e comunitário.
- III. Cooperação empresarial, institucional e partilha de conhecimento.
- IV. Atração e retenção de recursos especializados em TI e interligar conhecimentos e áreas relacionadas.
- V. Programas de formação para profissionais, certificações de competências digitais, bem como a promoção da literacia e educação digital.
- VI. Cooperação internacional para o desenvolvimento de infraestruturas digitais.
- VII. Criação dos instrumentos de apoio no domínio da TD, bem como garantia do acesso ao apoio público. Minimizando-se as barreiras e obstáculos existentes, no sentido de garantir que os mesmos alcançam os destinatários.
- VIII. Monitorização do impacto dos apoios, no sentido de conseguir medir o contributo, previsto e real, dos mesmos para a TD.

## Referências

- [1]. Documento final da Avaliação do Potencial Económico da Transição Digital em Portugal, Portugal, 2023.
- [2]. Digital Decade Country Report: Portugal, 2023.
- [3]. Portugal, Relatório do Índice de Digitalidade da Economia e da Sociedade (IDES), 2022.
- [4]. IPSOS APEME, Inquérito sobre a transformação digital nas empresas portuguesas, Portugal, 2022.
- [5]. UNFCCC, Roteiro para a Neutralidade Carbónica 2050 (RNC2050), 2019. Disponível em: [https://unfccc.int/sites/default/files/resource/RNC2050\\_PT-22-09-2019.pdf](https://unfccc.int/sites/default/files/resource/RNC2050_PT-22-09-2019.pdf)



## 4.5.2. Redes de coopetição digital para a descarbonização das rochas ornamentais em Portugal

**Agostinho da Silva**

*CEI-Zipor, Global Engineering Group*

*CISE, Electromechatronic Systems Research Centre*

*CEFAGE Center for Advanced Studies in Management and Economics*

### Resumo

Num contexto global de crescente urgência climática e transição para uma economia de baixo carbono, este estudo analisa o impacto das redes de coopetição habilitadas por tecnologias digitais nas emissões de CO<sub>2</sub> equivalente no setor das Rochas Ornamentais (RO) em Portugal. Através de um estudo de caso com três PME do setor, foi implementada uma rede piloto de coopetição apoiada pela plataforma Cockpit4.0+, baseada em tecnologias da Internet das Coisas Industrial (IIoT). O desempenho ambiental foi monitorizado ao longo de 54 dias úteis, comparando uma fase de práticas indi-

viduais (MPS) com uma fase de cooperação digital (PC.HTD). Os resultados revelam uma redução significativa de 21,8% nas emissões específicas de CO<sub>2</sub>-eq por unidade produzida, bem como melhorias na estabilidade e previsibilidade operacionais. Estes achados evidenciam o potencial das redes de coopetição digitalmente suportadas como mecanismos eficazes para a descarbonização de setores industriais tradicionais, com aplicabilidade relevante no contexto do Roteiro para a Descarbonização do Setor da Rocha Ornamental em Portugal (ROADTO2050).

Palavras-chave: Coopetição, descarbonização, internet das coisas industrial (IIoT)

### Introdução

Num contexto global marcado pela transição energética e pelo reforço dos compromissos com a neutralidade carbónica, impõe-se a reconfiguração dos modelos tradicionais de organização industrial e interempresarial [1]. Esta transformação é particularmente premente em setores de elevada intensidade material e energética, como é o caso da indústria das Rochas Ornamentais (RO).

Neste enquadramento, o conceito coopetição – uma estratégia híbrida que combina simultaneamente elementos de cooperação e de concorrência entre empresas do mesmo setor – emerge como uma abordagem inovadora com elevado potencial transformador [2]. As redes de coopetição têm vindo a ser apontadas como mecanismos eficazes para a melhoria da eficiência das Pequenas e Mé-

dias Empresas (PME), através da partilha de conhecimento, recursos e tecnologias [3].

Contudo, persiste uma lacuna significativa na investigação empírica relativamente aos impactos destas redes sobre a sustentabilidade. São ainda escassos os estudos que avaliem, de forma sistemática, os efeitos da coopetição em indicadores ambientais como a pegada de carbono, a eficiência energética ou a valorização de materiais [4]. Esta escassez de conhecimento é particularmente evidente em setores industriais tradicionais, como o das RO [5].

A relevância estratégica do setor das rochas ornamentais em Portugal justifica um exame aprofundado das suas práticas em matéria de sustentabilidade e inovação. De acordo com a ASSIMAGRA (2021), o setor é composto maioritariamente por PME, empregando diretamente mais de 16.600 trabalhadores. Portugal é o oitavo maior exportador mundial de rochas ornamentais e ocupa a segunda posição a nível mundial em termos de comércio internacional per capita, com presença em 116 mercados [6]. Para além da sua importância nas exportações nacionais, o setor desempenha um papel determinante na coesão económica de várias regiões do interior, onde frequentemente constitui a principal atividade industrial. Esta centralidade económica, aliada à crescente pressão para a redução das emissões, torna o setor um caso particularmente relevante para a análise de estratégias de coopetição orientadas para a sustentabilidade.

É neste contexto que o presente estudo se propõe a responder à seguinte questão: Poderão as redes de coopetição, suportadas por tecnologias digitais, contribuir para a redução das emissões de carbono no setor das Rochas Ornamentais?

O principal objetivo consiste em avaliar os efeitos destas redes no desempenho ambiental das empresas do setor, com base na monitorização de indicadores-chave de sustentabilidade. Para tal, adota-se uma abordagem de estudo de caso, envolvendo três empresas portuguesas da fileira das RO que participaram numa rede de coopetição piloto, suportada por tecnologias baseadas na Internet das Coisas Industrial (*Industrial Internet of Things* – IIoT).

A presente investigação enquadra-se nos objetivos do Acordo de Paris, ratificado por 195 países, que visa limitar o aumento da temperatura média global a 2 °C face aos níveis pré-industriais até 2050 [7]. A principal contribuição deste estudo reside na produção de evidência empírica sobre o potencial das redes de coopetição como vetor de descarbonização. Ao demonstrar os seus impactos positivos em métricas como a eficiência energética, o aproveitamento de matéria-prima e a redução da pegada de carbono, pretende-se informar políticas públicas e estratégias empresariais no âmbito do Roteiro para a Descarbonização do Setor da Rocha Ornamental em Portugal (ROADTO2050)<sup>4</sup>, com possível aplicabilidade a outros setores industriais compostos por PME em transição para modelos de produção mais sustentáveis.

## Enquadramento teórico e conceptual

A crescente urgência de transição para uma economia de baixo carbono tem impulsionado a valorização de modelos colaborativos capazes de potenciar a eficiência e a sustentabilidade no setor industrial [8]. Entre estes modelos, destaca-se a coopetição, definida como uma estratégia que combina simultaneamente cooperação e concorrência entre empresas, afirmando-se como um instrumento promissor para enfrentar desafios ambientais complexos [9]. Esta abordagem parte do reconhecimento de que, apesar da competição por mercado, inovação e recursos, as empresas podem — e devem — colaborar em domínios que exigem ação coletiva, como é o caso da sustentabilidade ambiental [10].

As redes de coopetição entre PME assumem especial relevância em setores dominados por estruturas empresariais de menor dimensão e recursos limitados [11]. Nestes contextos, a partilha de recursos e capacidades permite viabilizar práticas sustentáveis com impacto direto na redução de desperdícios, no aumento do aproveitamento de matérias-primas e na adoção de fontes de energia limpa [12]. Estas redes não apenas geram economias de escala e de escopo, como possibilitam ganhos ambientais significativos, muitas vezes inalcançáveis de forma isolada.

Por via da coopetição, as empresas conseguem distribuir encargos financeiros e operacionais, viabilizando soluções conjuntas como sistemas partilhados de reciclagem de resíduos, tecnologias de captura e monitorização de emissões, ou projetos comuns de geração de energia renovável [13]. Estes modelos colaborativos tornam a sustentabilidade mais acessível e escalável, ampliando o impacto

ambiental positivo das iniciativas empresariais.

Adicionalmente, a coopetição permite uma racionalização do uso de recursos, através da redução de redundâncias operacionais e da promoção de maior eficiência no uso de energia e matérias-primas. A partilha de infraestruturas logísticas, sistemas de distribuição e plataformas digitais de monitorização pode conduzir a reduções significativas no consumo de combustíveis fósseis e nas emissões de gases com efeito de estufa [14]. Esta articulação estratégica contribui também para o reposicionamento das empresas enquanto agentes ativos da sustentabilidade, em resposta às crescentes exigências regulatórias e de mercado.

Outro contributo relevante da coopetição reside na promoção de modelos de economia circular. As redes colaborativas possibilitam, por exemplo, a valorização cruzada de subprodutos — transformando resíduos de produção de uma empresa em recursos para outra — promovendo a reutilização de materiais e a redução da pressão sobre os recursos naturais [15]. Esta inovação interorganizacional fortalece a resiliência dos sistemas industriais e favorece abordagens sistémicas de sustentabilidade.

Neste ecossistema colaborativo, as tecnologias digitais, e em particular as associadas à IIoT, desempenham um papel estruturante. Soluções como o Cockpit4.0+ [16] permitem a monitorização em tempo real de processos industriais, a recolha e partilha contínua de dados entre empresas, bem como a tomada de decisão baseada em indicadores ambientais fiáveis. Estas ferramentas digitais promovem transparência, rastreabilidade e eficiên-

<sup>4</sup> <https://assimagra.pt/projectos/road-to-2050>

cia operacional [5], alicerçando as redes de cooperação em bases tecnológicas robustas.

Em síntese, a cooperação configura-se como um quadro estratégico estruturante para PME em setores como o das Rochas Ornamentais, onde os desafios da sustentabilidade exigem abordagens colaborativas e digitalmente suportadas. Ao integrar objetivos ambientais nas dinâmicas de colabo-

ração entre concorrentes, as empresas conseguem inovar, reduzir custos, otimizar recursos e, simultaneamente, alinhar-se com os imperativos da descarbonização e da economia circular – pilares essenciais para um futuro sustentável da indústria extrativa e transformadora.

## Metodologia e resultados

Para monitorizar o contributo das atividades industriais no esforço de descarbonização, têm sido amplamente adotadas metodologias de quantificação da pegada de carbono, destacando-se, entre estas, a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), conforme definido nas normas ISO 14040:2006. Esta abordagem permite uma análise holística dos impactos ambientais associados a um produto, processo ou serviço, abrangendo todas as fases do seu ciclo de vida – desde a extração das matérias-primas, passando pela produção, distribuição e utilização, até à sua reciclagem ou eliminação final [17].

Reconhecendo a multiplicidade de fatores que influenciam a pegada de carbono no contexto industrial – nomeadamente operações produtivas, logística e atividades de suporte – foi desenvolvida uma estrutura de avaliação quantitativa centrada nas emissões de CO<sub>2</sub> equivalente por unidade produzida (KPI\_CO<sub>2</sub>e) [18]. Este indicador permite uma medição objetiva da intensidade carbónica dos processos industriais. No presente estudo, as emissões foram estimadas com base no consumo de energia elétrica por unidade produzida, aplican-

do o fator de emissão da eletricidade em Portugal, o que assegura a comparabilidade dos resultados entre diferentes empresas.

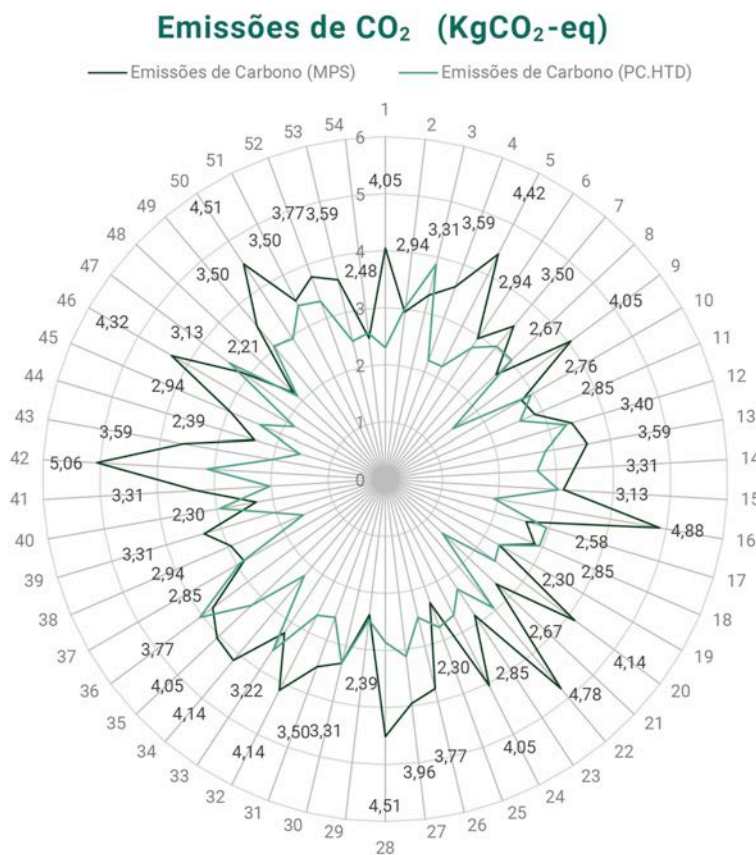
Para a implementação do estudo, foi constituída uma rede piloto de cooperação envolvendo três empresas do setor das RO, ao longo de um período de 54 dias úteis, distribuído por duas fases experimentais: Fase 1 – Melhores Práticas no Setor (MPS): fase de referência, baseada nas práticas autónomas e isoladas das empresas, sem cooperação estruturada nem suporte digital; Fase 2 – Práticas de Cooperação Habilitadas por Tecnologias Digitais (PC.HTD): fase colaborativa, suportada pela adoção conjunta do sistema Cockpit4.0+ [5], um artefacto digital baseado em tecnologias da Internet das Coisas Industrial (IIoT), que operacionalizou a rede de cooperação.

Esta configuração experimental permitiu comparar, de forma sistemática, o desempenho ambiental e operacional das empresas antes e depois da implementação da rede colaborativa. A recolha e análise de dados foi realizada diariamente, com base

em registos automáticos provenientes de equipamentos digitais e sistemas internos, assegurando rastreabilidade, granularidade temporal e rigor analítico.

As medições diárias ao longo das duas fases encontram-se sintetizadas na Figura 4.23, que ilustra a evolução do KPI\_CO<sub>2</sub>e ao longo dos 54 dias úteis.

A representação gráfica em formato polar permite comparar as emissões diárias nas duas condições. A linha azul (MPS) revela maior dispersão e picos superiores a 4,5 kg CO<sub>2</sub>-eq em diversos momentos (dias 20, 26, 30, 33 e 46), enquanto a linha laranja (PC.HTD) apresenta menor amplitude e uma tendência descendente mais estável, com valores máximos que não ultrapassam os 3,5 kg CO<sub>2</sub>-eq.



► Figura 4.23. Evolução diária das emissões de CO<sub>2</sub> equivalente por peça produzida nas duas fases do estudo (MPS e PC.HTD).

Da análise dos resultados, verificou-se uma redução significativa das emissões de CO<sub>2</sub> equivalente por unidade produzida. O valor médio do KPI\_CO<sub>2</sub>e decresceu de 2,88 kg CO<sub>2</sub>-eq/unidade na fase MPS

para 2,26 kg CO<sub>2</sub>-eq/unidade na fase PC.HTD, o que representa uma redução absoluta de 0,63 kg CO<sub>2</sub>-eq/unidade, correspondente a uma diminuição relativa de 21,8%.

Estes resultados evidenciam o potencial das redes de cooperação digitalmente habilitadas para gerar impactos ambientais positivos no setor. Os ganhos observados em eficiência energética, redução de desperdícios e otimização de recursos foram catalisados pela partilha de dados em tempo real e pela coordenação interempresarial viabilizada por tecnologias IIoT.

Para além da redução média de emissões, os dados recolhidos revelam uma menor variabilidade diária durante a fase PC.HTD, sinalizando uma

maior estabilidade operacional, associada a maior previsibilidade e controlo dos processos – atributos essenciais para sistemas industriais mais resilientes e sustentáveis.

Adicionalmente, a capacidade do sistema Cockpit4.0+ para identificar e corrigir ineficiências em tempo real reforça a ideia de que a cooperação suportada por tecnologias digitais pode funcionar como um acelerador prático da transição climática, sobretudo em setores compostos maioritariamente por PME.

## Conclusão

O presente estudo demonstrou que redes de cooperação habilitadas por tecnologias digitais podem representar um instrumento eficaz para a descarbonização do setor das Rochas Ornamentais. A redução de 21,8% nas emissões de CO<sub>2</sub> equivalente por unidade produzida constitui uma evidência empírica clara do impacto positivo da colaboração interempresarial estruturada, alicerçada em dados em tempo real e partilha tecnológica.

Para além dos ganhos ambientais, os resultados revelam benefícios adicionais em termos de estabilidade operacional, previsibilidade e eficiência produtiva, essenciais para a competitividade de PME em contextos industriais exigentes.

Com base nas conclusões obtidas, destacam-se as seguintes recomendações: (1) Incentivar políticas públicas que promovam redes de cooperação digital no setor, através de instrumentos financeiros e

regulatórios orientados para a inovação colaborativa e a sustentabilidade; (2) Fomentar a adoção de tecnologias digitais de monitorização ambiental (como IIoT), com especial enfoque em soluções acessíveis e escaláveis para PME; (3) Integrar indicadores de desempenho ambiental nas práticas de gestão partilhada, criando culturas de colaboração sustentada por métricas objetivas; e (4) Expandir o modelo experimental a outras tipologias de empresas e regiões, validando a sua replicabilidade noutros segmentos da indústria extrativa e transformadora.

No contexto do ROADTO2050, estes resultados reforçam a necessidade de repensar os modelos de competitividade no setor da pedra natural, não como antagonistas à sustentabilidade, mas como catalisadores de inovação colaborativa para a neutralidade carbónica.

## Referências

- [1]. M. Draghi, *The Future of European Competitiveness: A competitiveness strategy for Europe*. Brussels, 2024.
- [2]. A. Da Silva and A. J. Marques Cardoso, "Industrial Internet of Things-Driven Coopetition Networks for SMEs," *Procedia Comput. Sci.*, vol. 253, no. 2024, pp. 227–236, 2025, doi: 10.1016/j.procs.2025.01.086.
- [3]. J. M. Crick and D. Crick, "Don't stop believing: The manifestations of coopetition in export markets," *Int. Bus. Rev.*, vol. 34, no. 3, p. 102397, Apr. 2025, doi: 10.1016/j.ibusrev.2025.102397.
- [4]. D. Schlee and T. Gutmann, "My friend, the enemy: Developing a model for coopetition in the professional services setor," *J. Bus. Res.*, vol. 191, p. 115252, Mar. 2025, doi: 10.1016/j.jbusres.2025.115252.
- [5]. A. da Silva and A. J. M. Cardoso, "Coopetition with the Industrial IoT: A Service-Dominant Logic Approach," *Appl. Syst. Innov.*, vol. 7, no. 3, p. 47, May 2024, doi: 10.3390/asi7030047.
- [6]. A. Silva and A. Pata, "Value Creation in Technology Service Ecosystems - An Empirical Case Study," in *Lecture Notes in Mechanical Engineering*, 2023, pp. 26–36.
- [7]. United Nations, "Conference of the Parties Twenty-first session - ADOPTION OF THE PARIS AGREEMENT," 2015, vol. FCCC/CP/20, p. 32, [Online]. Available: <http://unfccc.int/resource/docs/2015/cop21/eng/l09r01.pdf>.
- [8]. A. Silva and I. Almeida, "Towards INDUSTRY 4.0 | a case STUDY in ornamental stone setor," *Resour. Policy*, vol. 67, no. March, p. 101672, 2020, doi: 10.1016/j.resourpol.2020.101672.
- [9]. A. Rouyre, A.-S. Fernandez, and O. Bruyaka, "Big problems require large collective actions: Managing multilateral coopetition in strategic innovation networks," *Technovation*, vol. 132, p. 102968, 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.technovation.2024.102968>.
- [10]. J. Dai, Y. "Henry" Jin, D. E. Cantor, I. Elking, and L. Guntuka, "An experimental investigation of environmental knowledge sharing in a supply chain coopetition situation," *Int. J. Oper. Prod. Manag.*, vol. 45, no. 2, pp. 628–650, Jan. 2025, doi: 10.1108/IJOPM-10-2023-0840.
- [11]. S. Arora and A. Brintrup, "How does the position of firms in the supply chain affect their performance? An empirical study," *Appl. Netw. Sci.*, vol. 6, no. 1, p. 19, Dec. 2021, doi: 10.1007/s41109-021-00364-9.
- [12]. S. Manzhynski and G. Biedenbach, "The knotted paradox of coopetition for sustainability: Investigating the interplay between core paradox properties," *Ind. Mark. Manag.*, vol. 110, pp. 31–45, Apr. 2023, doi: 10.1016/j.indmarman.2023.02.013.
- [13]. R. Bouncken, A. Kumar, J. Connell, A. Bhattacharyya, and K. He, "Coopetition for corporate responsibility and sustainability: does it influence firm performance?," *Int. J. Entrep. Behav. Res.*, vol. 30, no. 1, pp. 128–154, Jan. 2024, doi: 10.1108/IJEBR-05-2023-0556.
- [14]. D. Kämpf, "Coopetition in the Context of the Sustainability Goals," *Reg. Bus. Stud.*, vol. 14, no. 2, pp. 47–61, Dec. 2022, doi: 10.33568/rbs.3353.
- [15]. D. Mwesiumo, M. Harun, and H. Hogset, "Unravelling the black box between coopetition and firms' sustainability performance," *Ind. Mark. Manag.*, vol. 114, pp. 110–124, Oct. 2023, doi: 10.1016/j.indmarman.2023.08.008.
- [16]. A. Silva and M. M. Gil, "Industrial processes optimization in digital marketplace context: A case study in ornamental stone setor," *Results Eng.*, vol. 7, p. 100152, Sep. 2020, doi: 10.1016/j.rineng.2020.100152.
- [17]. T. A. Rebello, R. Zulcão, J. L. Calmon, and R. F. Gonçalves, "Comparative life cycle assessment of ornamental stone processing waste recycling, sand, clay and limestone filler," 2019, doi: 10.1177/0734242X18819976.
- [18]. [M. B. Hannouf, A. Padilla-Rivera, G. Assefa, and I. Gates, "Social life cycle assessment (S-LCA) of technology systems at different stages of development," *Int. J. Life Cycle Assess.*, no. 0123456789, 2024, doi: 10.1007/s11367-024-02373-z.



## 4.6. Medidas de Economia Circular

A economia circular desempenha um papel cada vez mais relevante no setor industrial da pedra natural, sobretudo no contexto atual de transição para uma economia de baixo carbono e de maior eficiência no uso de recursos com vista a um desenvolvimento mais sustentável. Este modelo procura maximizar a eficiência no uso de recursos, promovendo a redução de resíduos, a reutilização de subprodutos e a valorização de materiais ao longo de todo o ciclo de vida, promovendo a redução de resíduos, a reutilização de subprodutos e a valorização de materiais minerais que, tradicionalmente, seriam depositos em aterro. A exploração de pedra natural envolve processos de extração, corte, transformação e acabamento, dos quais resulta um volume significativo de resíduos e excedentes minerais com elevado potencial de reaproveitamento, quer dentro da própria operação, quer através de simbioses industriais com outros setores, como a construção, a cerâmica, o cimento ou a agricultura.

A economia circular é relevante no setor da pedra natural, impulsionando a transição de um modelo linear, baseado na extração, transformação e descarte, para um sistema mais circular e eficiente, onde os resíduos e efluentes são encarados como recursos (Figura 4.24).

Neste sentido, a economia circular surge como uma abordagem estratégica que permite ao setor evoluir de um modelo linear, assente na extração e posterior descarte, para um sistema mais eficiente e sustentável, onde os resíduos e efluentes passam a ser encarados como recursos com valor económico e ambiental. Esta mudança contribui não só para a redução do impacto ambiental e para a diminuição dos custos operacionais, mas também para o reforço da competitividade das empresas num contexto de requisitos ESG cada vez mais exigentes.

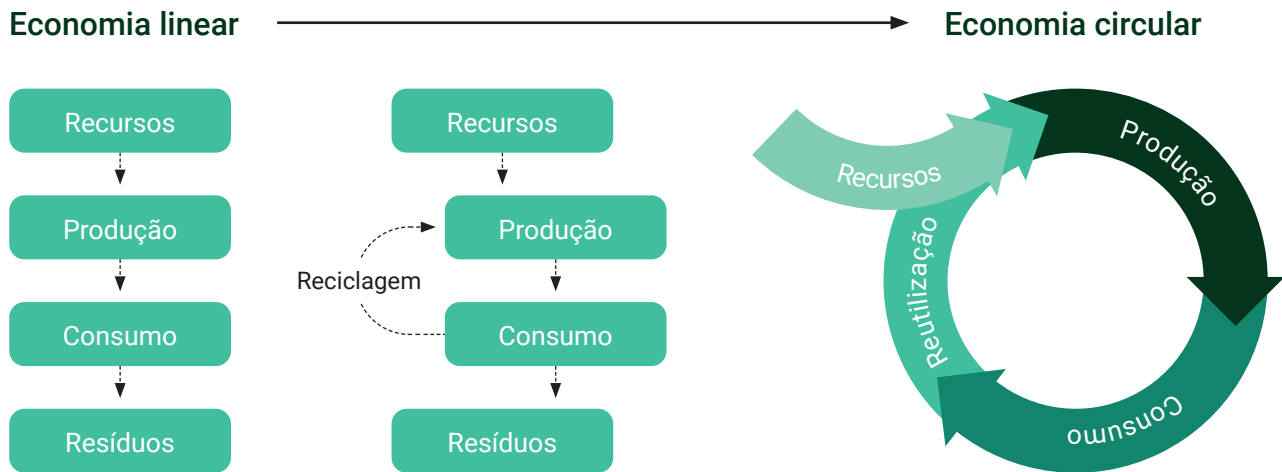
As estratégias de economia circular no setor da

pedra natural visam reduzir a extração de recursos naturais primários e prolongar o valor útil dos materiais ao longo do tempo, promovendo um sistema produtivo mais eficiente, sustentável e alinhado com as exigências ambientais atuais. Entre as principais estratégias destacam-se:

- **Extensão do ciclo de vida** - visa prolongar a utilidade dos produtos de pedra através da sua durabilidade natural, reutilização e revalorização em fim de vida. Inclui também valorizar resíduos, como blocos com defeito, restos de corte, lamas de ETARI através da sua reconversão ou transformação em novos materiais ou produtos ou aplicações;
- **Pensamento de ciclo de vida** - Procura otimizar o desempenho ambiental em todas as etapas, desde a extração e transformação até à utilização e fim de vida. Esta abordagem permite identificar oportunidades de redução de impactes ambientais, melhorar a eficiência energética e hídrica e promover escolhas mais sustentáveis ao longo de toda a cadeia de valor;
- **Ecodesign** - integra considerações ambientais no design do produto, influenciando até 80% dos seus impactes ambientais ao longo do ciclo de vida. Desde a conceção, procura otimizar o desempenho ambiental ao longo de todo o ciclo de vida, promovendo o uso eficiente de recursos. No setor da pedra, o ecodesign pode traduzir-se na definição de formatos que reduzam desperdícios, na escolha de processos de corte mais eficientes, na otimização do transporte e na conceção de produtos mais fáceis de reutilizar;
- **Gestão de resíduos** - promove a reutilização e valorização de materiais anteriormente considerados subprodutos ou desperdícios, como

lamas, aparas e pó de pedra, integrando-os em novos produtos. Desta forma, o setor reduz significativamente a sua pegada ambiental, diminui a necessidade de extração de matérias-primas virgens e contribui para a conservação dos recursos naturais. Esta abordagem circular permite não só minimizar os impactos negativos associados à deposição inadequada de resíduos, como também potenciar novas oportunidades de mercado, através do desenvolvimento de produtos inovadores com valor acrescentado, como agregados reciclados, argamassas técnicas ou materiais compósitos;

- **Simbioses industriais** – Promove a colaboração com outros setores industriais para tratar e transformar o que inicialmente seria considerado como resíduo num recurso útil noutras cadeias de valor, ou seja um novo produto ou matéria-prima. Como por exemplo a utilização de lamas de corte de pedra como aditivo na produção de cimento, a incorporação de resíduos calcários como corretivo agrícola, ou a utilização de britas e pó de pedra em misturas betuminosas para pavimentação. Esta sinergia permite reduzir custos, emissões e impactos ambientais, ao mesmo tempo que gera oportunidades económicas adicionais.

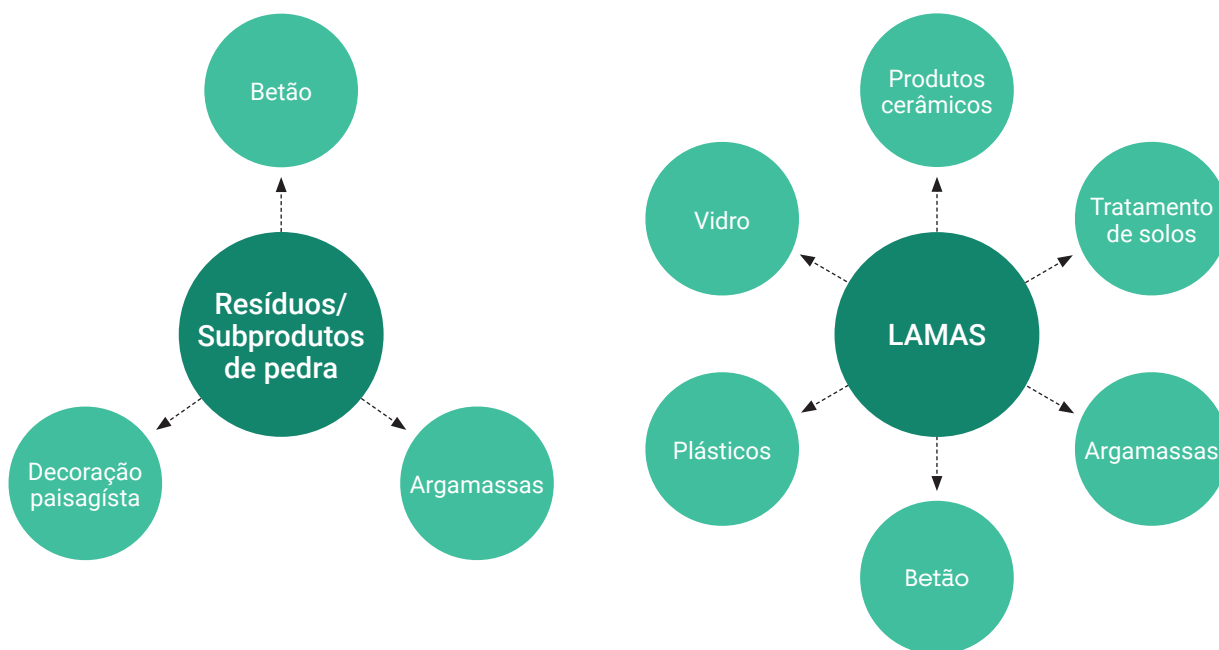


► Figura 4.24. Comparação entre a abordagem da economia circular e a da economia linear.

### 4.6.1. Exemplos de boas práticas ambientais

Entre as abordagens mais relevantes de simbioses industriais está o reaproveitamento de resíduos de corte e polimento, lamas de tratamento dos efluentes líquidos, que podem ser transformados em agregados para construção, componentes cerâmicos ou novos produtos compósitos. A recirculação da água industrial, através de sistemas fechados com decantação e filtragem, permite minimizar o consumo de recursos hídricos e prevenir a contaminação de recursos naturais. Além disso, são aplicadas estratégias de reincorporação e revalorização, nas quais resíduos ou subprodutos de pedra, materiais

excedentes de obra ou elementos provenientes da desconstrução são limpos, reprocessados, como por exemplo através de corte, sendo posteriormente reintroduzidos no mercado, frequentemente com uma nova função estética ou utilitária. A durabilidade e intemporalidade da pedra natural tornam-na especialmente adequada para modelos circulares, em que a reutilização e a flexibilidade de aplicação contribuem para reduzir impactes ambientais e gerar valor económico a partir do que antes era considerado desperdício.



► Figura 4.25. Simbioses industriais podem levar à requalificação de resíduos como matérias-primas secundárias ou mesmo novos produtos.

Em termos de ecodesign, uma das abordagens mais promissoras é a otimização do corte e dimensionamento da pedra, de forma a minimizar desperdícios na transformação e permitir o reaproveitamento de remanescentes. O uso de acabamentos naturais ou com menor carga química, bem como a preferência por fixações reversíveis ou recicláveis, também contribuem para produtos mais sustentáveis.

#### 4.6.2. Melhoria e eficiência hídrica

A adoção das melhores tecnologias disponíveis para o tratamento e reutilização da água de processo na exploração e transformação de pedra natural permite reduzir o consumo de água potável, minimizar a geração de efluentes contaminados e otimizar a gestão e eficiência hídrica. Estas tecnologias permitem fechar ciclos internos, diminuir descargas para o ambiente e garantir um uso mais responsável dos recursos, alinhando o setor com as metas de sustentabilidade e com as exigências regulamentares atuais.

Entre as soluções mais eficazes destacam-se os sistemas de recirculação em circuito fechado, que permitem reutilizar continuamente a água utilizada no corte e polimento; os sistemas de floculação e decantação avançada de lamas, que garantem uma separação eficaz das lamas e partículas minerais; bem como tecnologias de filtração por membranas e ultrafiltração, adequadas para obter elevados níveis de pureza e possibilitar a reutilização total da água nos processos mais exigentes. Em alguns

Ao considerar o ciclo de vida completo da pedra, da extração à reutilização ou demolição, o ecodesign e a avaliação de ciclo de vida permitem desenvolver soluções que combinam funcionalidade, estética e baixo impacto ambiental, reforçando a competitividade do setor num mercado cada vez mais orientado para a sustentabilidade.

casos, a integração de sistemas automáticos de monitorização e controlo da qualidade da água permite ajustar os parâmetros em tempo real, aumentando o desempenho e reduzindo desperdícios.

A adoção destas tecnologias traz múltiplos benefícios para as empresas: contribui para a preservação dos recursos hídricos, assegura o cumprimento de normas ambientais e reforça a competitividade do setor, ao promover uma gestão mais eficiente dos recursos e a redução dos custos operacionais associados ao consumo e tratamento de água. Estas práticas consolidam o setor da pedra natural como um agente ativo na transição para uma economia mais sustentável e resiliente.

### 4.6.3. Qualidade do ar e ruído

Na atividade de extração, o setor implementa diversas medidas para a minimização de dispersão de poeiras, destacando-se a rega por aspersão de água nos acessos à exploração e zonas de circulação, especialmente durante períodos secos. Sempre que possível é mantida e reforçada uma cortina arbórea no perímetro da exploração, que funciona como barreira natural à propagação de poeiras. Esta última medida também contribui para a atenuação do ruído provocado pela movimentação dos equipamentos. Assim como a escolha de equipamentos que originem o menor ruído possível e a sua manutenção e inspeção periódica, são medidas adotadas pelas empresas para diminuir o im-

pacte em termos de ruído e garantir o cumprimento dos limites legais de ruído.

Na transformação da pedra a utilização de sistemas de despoeiramento permite a captação de poeiras geradas durante movimentação e principalmente o corte, polimento e acabamento, as quais poderão posteriormente ser reutilizadas noutro setor industrial (como cimento, betão, cerâmica ou pavimentação) ou utilizado na recuperação paisagística da exploração, reforçando uma abordagem de economia circular e redução de resíduos.

### 4.6.4. Recuperação paisagística

Envolve a reconfiguração do relevo, estabilização de taludes, reposição de solos e revegetação com espécies autóctones, promovendo a reintegração da área explorada na paisagem. Esta etapa é essencial para restaurar a funcionalidade ecológica do espaço, promover a biodiversidade e assegurar a segurança e estabilidade física da área após a cessação da atividade extrativa. Alinhada com os princípios da economia circular, a recuperação

paisagística pode incluir a reutilização de resíduos do próprio processo industrial, como materiais de enchimento ou agregados finos, desde que devidamente autorizada. Esta prática desde que cumpra exigências legais, valoriza ambiental e socialmente o território e reforça o compromisso do setor com a sustentabilidade, contribuindo para uma relação mais harmoniosa entre a atividade económica e a conservação do meio natural.

#### 4.6.5. Avaliação de ciclo de vida – pegada carbono

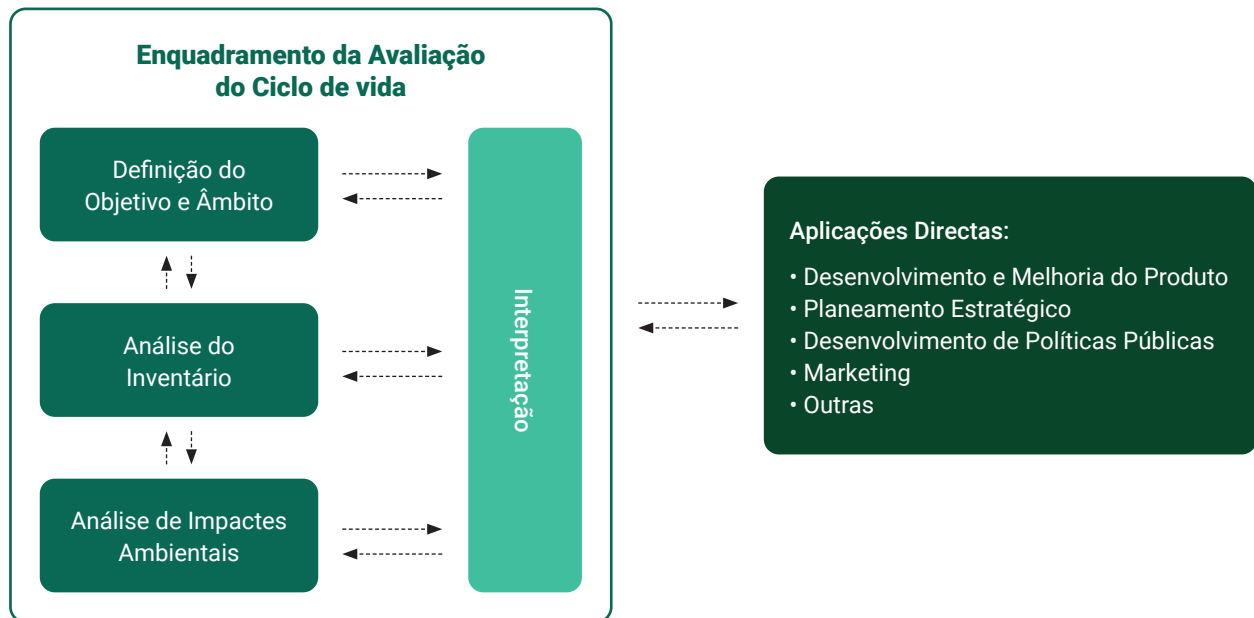
A Avaliação do Ciclo de Vida do Produto (ACV), conhecida internacionalmente por LCA (Life Cycle Assessment) consiste em analisar de forma sistemática os impactos ambientais associados a produtos em todas as etapas do seu ciclo de vida. Esta análise abrange desde a fase de concepção, à fase de extração ou processamento das matérias-primas/recursos naturais, passando pelas etapas de produção, distribuição (transporte), aplicação em obra (construção ou instalação quando aplicável), utilização (etapa de uso) e destino final dos produtos, seja este reutilização, reciclagem ou eliminação (1). Este método considera qualquer alteração no ambiente, tanto adversa como benéfica, global ou parcialmente que possa resultar direta ou indiretamente do produto. Trata-se, portanto, de uma abordagem abrangente e integrada, que evita uma visão parcial e permite tomadas de decisão mais sustentáveis ao longo da cadeia de valor.

Os principais elementos da ACV incluem a:

- Identificação e quantificação das cargas ambientais envolvidas (por exemplo, consumo de energia e matérias-primas, emissões atmosféricas, geração de resíduos, efluentes líquidos, etc.);
- Avaliação dos potenciais impactos ambientais decorrentes dessas cargas;
- Avaliação de alternativas disponíveis que possam reduzir os impactos ambientais identificados.

A metodologia de ACV é formalizada internacionalmente pelas normas ISO 14040 e ISO 14044, que estruturam o processo em quatro fases principais (ver Figura 4.26):

1. Definição do objetivo e do âmbito: delimitação do estudo, identificação do produto ou processo a ser avaliado, definição das fronteiras do sistema e da unidade funcional;
2. Inventário de ciclo de vida (LCI - Life Cycle Inventory): levantamento de dados quantitativos sobre fluxos de entrada (inputs) e saída (outputs) relacionados às etapas do ciclo de vida do produto;
3. Avaliação de impacto (LCIA - Life Cycle Impact Assessment): análise dos potenciais impactos ambientais com base nos dados do inventário, considerando categorias como aquecimento global, acidificação, eutrofização, ecotoxicidade, entre outros;
4. Interpretação: análise dos resultados, identificação de pontos críticos e formulação de recomendações para melhoria ambiental e tomada de decisão.



► Figura 4.26. Fases da ACV (Almeida, 2019, com base na ISO14040).

## Etapas do ciclo de vida

As etapas típicas do ciclo de vida de materiais de construção (tal como ilustrado na figura 2 segundo a EN15804+A2) incluem [1]:

### a) Extração de recursos naturais (etapa A1)

Abrange a extração e obtenção das matérias-primas em função do material de construção (como exemplos: granito, calcário, mármore, etc), incluindo o consumo energético, emissões de partículas e outros gases de combustão, impacte paisagístico e no solo.

### b) Produção / Fabricação (etapa A3)

Inclui o processamento das matérias-primas, formulação dos materiais de construção. Esta fase pode ser particularmente relevante devido ao elevado consumo energético e às respetivas emissões atmosféricas, produção de resíduos e em alguns casos efluentes líquidos.

### c) Transporte /Distribuição (A4)

Envolve o transporte dos produtos acabados até aos locais de aplicação em obra, e respetivos consumos energéticos associados, emissões, resíduos, etc...

**d) Construção / Instalação (A5)**

Refere-se à colocação dos materiais em obra, utilizados na construção. Pode incluir consumo de recursos adicionais (colas, argamassas, energia), emissões difusas e geração de resíduos.

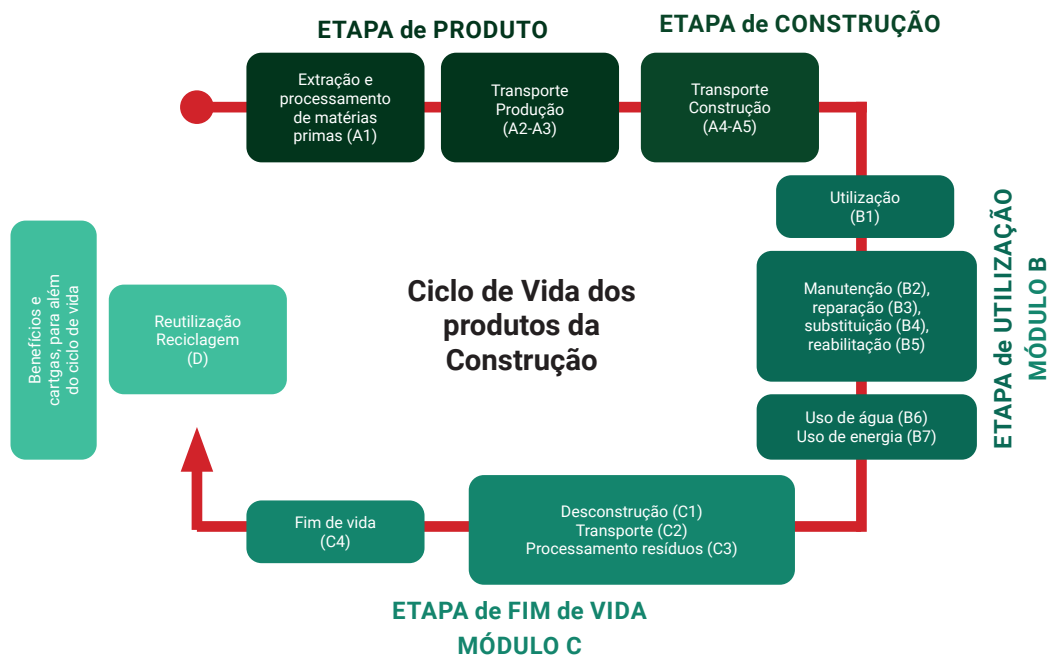
**e) Utilização (etapa B)**

Durante esta fase, avalia-se a durabilidade, desempenho funcional, facilidade de manutenção e eventuais emissões em uso (ex: libertação de partículas ou compostos orgânicos voláteis – COVs). Neste caso aplicam-se as operações de limpeza dos materiais de construção (ex. pavimentos e revestimentos), e eventual libertação de COVs.

**f) Desconstrução (ou demolição) (etapa C)**

Refere-se à remoção dos materiais ao fim da sua vida útil. Envolve consumo energético, geração de resíduos e logística de desmantelamento, etc.

Engloba o tratamento dos resíduos gerados: aterro, incineração, reciclagem ou valorização. A circularidade depende, neste ponto, da existência de soluções tecnológicas e logísticas para a reintegração dos materiais nos ciclos produtivos.



► Figura 4.27. Ciclo de Vida dos Produtos de Construção baseado EN 15804, EN 15942 e EN 15978.



Já a pegada de carbono é uma métrica que quantifica o total de emissões de gases de efeito estufa (GEE) associadas a um produto ou serviço, expressa em toneladas de CO<sub>2</sub> equivalente (tCO<sub>2</sub>e). No setor da pedra natural, esta métrica abrange todas as etapas, desde a extração, transformação, produto final instalado até ao fim de vida, permitindo identificar oportunidades de mitigação de impactes ambientais. As principais fontes de emissões no setor da pedra natural incluem:

#### a) Extração

- Uso de maquinaria pesada (escavadoras, perfuradoras, cortadoras).
- Consumo de combustíveis fósseis (diesel e eletricidade).
- Emissões associadas à gestão de resíduos e desmonte.

#### b) Transporte

- Transporte de blocos da extração para a transformação em fábrica.
- Transporte para o cliente final ou obras.
- Emissões dependem de distância, tipo de veículo e combustível.

#### c) Transformação e acabamento

- Corte, polimento e acabamento consomem eletricidade e, em alguns casos, água.
- A eficiência energética das máquinas é um fator crítico.
- Uso de abrasivos e produtos químicos também

pode gerar impactes indiretos.

- O uso de gases de refrigeração em equipamentos de frio (ex. secadores de compressores, ares condicionados), poderá ser uma potencial fonte, nomeadamente se ocorrerem fugas desses gases.

#### d) Uso de água e energia

- A indústria da pedra natural é intensiva em água, especialmente para polimento e sistemas de refrigeração.
- A origem da eletricidade influencia fortemente a pegada (renovável vs fósseis). Aqui a instalação de painéis solares contribui positivamente para a redução da pegada de carbono.

#### e) Gestão de resíduos

- Restos de pedra podem ser reaproveitados ou enviados para aterro, impactando o ciclo de vida.
- Resíduos não reciclados aumentam o impacto ambiental total.

Os fatores que influenciam a pegada de carbono no setor da pedra natural são diversos e dependem tanto das características do material como das condições operacionais e logísticas, associadas ao ciclo de vida da pedra natural. Em primeiro lugar, o tipo de pedra exerce um papel determinante e relevante, uma vez que propriedades como densidade, dureza e durabilidade, condicionam as necessidades energéticas necessárias para o seu processamento como corte, desbaste e acabamento, bem como o impacto ambiental associado ao transporte devido ao peso. O aproveitamento da pedra é também uma condicionante fundamental.

A localização geográfica da unidade de extração/mina e do cliente final (mercados de destino) é igualmente relevante, dado que maiores distâncias (rotas logísticas extensas) implicam um incremento proporcional dos consumos energéticos e das respetivas emissões associadas ao transporte, independentemente do tipo de veículo utilizado. A fonte de energia utilizada ao longo do processo tem também um impacto significativo: quando a eletricidade provém de fontes renováveis, as emissões de gases com efeito de estufa reduzem-se substancialmente face a cenários baseados em combustíveis fósseis.

Outro fator crítico é a eficiência operacional, que inclui a manutenção adequada da maquinaria, a otimização dos processos de corte e transformação e o reaproveitamento dos resíduos gerados. Operações mais eficientes utilizam menos energia e reduzem a quantidade de desperdício e resíduos, contribuindo diretamente para a diminuição da pegada de carbono. Adicionalmente, o transporte internacional constitui uma fonte adicional de emissões, especialmente quando envolve longas distâncias por via marítima (menos crítico) ou rodoviária, podendo aumentar significativamente o impacto total associado ao ciclo de vida da pedra natural. Estes fluxos devem ser incluídos no inventário de

ciclo de vida (ICV) de acordo com o princípio de completude, podendo alterar significativamente o resultado final da pegada de carbono, especialmente em produtos destinados a mercados externos.

De uma forma resumida, as eventuais estratégias de Redução da Pegada de Carbono podem incluir:

- Eficiência energética: uso de maquinaria elétrica ou híbrida e otimização de processos. Uso de combustíveis considerados neutros em carbono desde que apresentam provas de sustentabilidade como biodiesel ou HVO.
- Energia renovável: instalação de painéis solares e compra de eletricidade “verde” certificada (ex. garantias de origem).
- Gestão de resíduos: reaproveitamento de restos de pedra para agregados ou outros produtos.
- Transporte otimizado: veículos elétricos, GNL, combustíveis ou otimização logística.
- Localização otimizada: selecionar sempre que possível fornecedores e clientes próximos para reduzir distâncias de transporte.

## Referências

- [1]. M. Almeida, M. Lopes, A. Amado, S. Ferreira e P. Frade, “Environmental Product Declarations and the Future of Sustainable Construction: Insights from the Stone Sector,” Revista TÉCNICA, no. 30, pp. 34–36, Aug./Sep. 2025.

## 4.7. O Sequestro de CO<sub>2</sub> no Setor da Pedra Natural: Estado de Arte e Potencialidades

Jorge Pedro<sup>1,2</sup>, Paula Afonso<sup>1</sup>, Patrícia Moita<sup>1,3</sup>,  
Júlio Carneiro<sup>1,4</sup>

<sup>1</sup> Departamento de Geociências, Universidade de Évora

<sup>2</sup> ICT – Instituto de Ciências da Terra

<sup>3</sup> Laboratório Hércules

<sup>4</sup> CREATE – Centro de Investigação em Ciência e Tecnologia para o Sistema Terra e Energia

### 4.7.1. Introdução

A emissão de CO<sub>2</sub> proveniente da combustão de combustíveis fósseis e da atividade de alguns setores industriais (e.g. refinação, petroquímico e cimenteiro) é reconhecida como a principal causa do aquecimento global e está diretamente relacionada com os efeitos adversos causadores das mudanças climáticas [1]-[4].

No panorama atual, dada a necessidade da utilização de combustíveis fósseis e a existência de setores industriais cujas emissões diretas não podem ser evitadas, a convergência para uma economia de baixo carbono requer alterações no paradigma energético e o desenvolvimento de ações de redução e mitigação das emissões de carbono.

A implementação de tecnologias de captura e armazenamento geológico de CO<sub>2</sub> (CCUS – *Carbon Capture, Utilization and Storage*) permite reduzir as emissões de carbono e fazer a ponte entre o sistema energético atual e um cenário ideal, no qual todas as necessidades energéticas sejam supridas por fontes renováveis. Por outro lado, a captura direta de carbono (CDR – *Carbon Dioxide Removal*) e posterior armazenamento, permite não só mitigar o efeito das emissões de CO<sub>2</sub>, como também compensar as atuais emissões inevitáveis.

O armazenamento geológico de CO<sub>2</sub> faz-se convencionalmente por injeção em aquíferos salinos profundos ou em reservatórios de hidrocarbonetos esgotados, a profundidades superiores a 800m, para assegurar que o CO<sub>2</sub> se encontra em fase densa. Apesar de armazenado em fase densa, o CO<sub>2</sub> injetado requer a existência de algum tipo de armadilha estrutural ou estratigráfica que impeça a migração do CO<sub>2</sub> para as camadas subjacentes ao local de armazenamento ou até mesmo para a superfície. Os processos de dissolução do CO<sub>2</sub> na água e as suas reações com os minerais constituintes dos materiais rochosos do reservatório ocorrem à escala das dezenas a centenas de anos e promovem progressivamente a carbonatação do CO<sub>2</sub> injetado, contribuindo para a segurança do armazenamento.

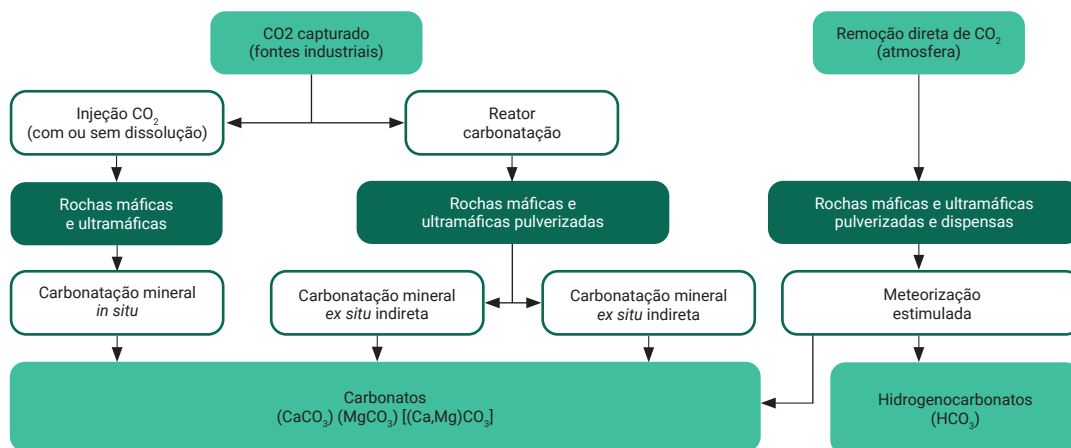
A carbonatação mineral é uma tecnologia específica de CCUS, alternativa ao armazenamento geológico convencional, reconhecida como uma abordagem eficiente para o armazenamento seguro e permanente de CO<sub>2</sub> (Figura 4.28). O potencial da carbonatação mineral para o armazenamento de CO<sub>2</sub> reside na capacidade das rochas máficas e ultramáficas. (e.g. peridotitos, gabros, basaltos) estabilizarem o CO<sub>2</sub> através de reações geoquímicas [5], [6]. Estas rochas enriquecidas, em minerais

silicatados ricos em Mg-Ca, reagem com o CO<sub>2</sub> conduzindo à precipitação de carbonatos e aprisionamento de CO<sub>2</sub> em fase sólida.

A carbonatação mineral pode operar como um processo: (1) *in situ*, situação em que o CO<sub>2</sub> é injetado em rochas máficas e ultramáficas, podendo ser previamente dissolvido em água; ou (2) *in situ*, no qual as rochas máficas e ultramáficas são extraídas, britadas e pulverizadas, ocorrendo o processo de carbonatação em instalações específicas, sob condições otimizadas de pressão e temperatura [7].

A meteorização estimulada (*enhanced weathering*) é uma tecnologia de remoção direta de carbono (*CDR – Carbon Dioxide Removal*), que também per-

mite o sequestro de CO<sub>2</sub> por carbonatação mineral, resultante do contacto direto entre o CO<sub>2</sub> e minerais silicatados ricos em Mg-Ca pulverizados e dispersos. Este processo tem como base a aceleração das reações de meteorização natural, sendo aplicado em dois contextos: (1) em áreas continentais sob condições atmosféricas, com a dispersão de rochas pulverizadas em solos agrícolas para reagirem diretamente com o CO<sub>2</sub> atmosférico; ou (2) em áreas litorais ou nos oceanos, através da adição de minerais pulverizados (olivina) ou compostos alcalinos (hidróxido de cálcio e hidróxido de magnésio) que reagem com o CO<sub>2</sub> dissolvido em fase aquosa [8].

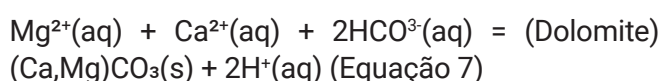
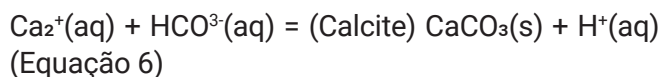
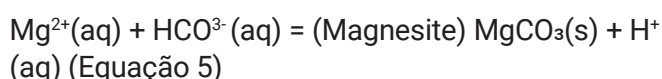
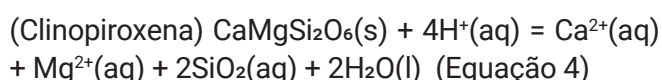
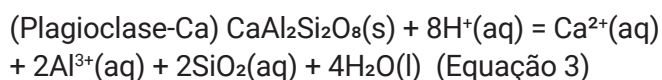
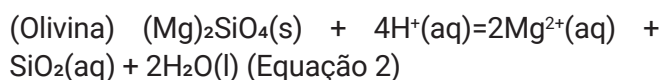
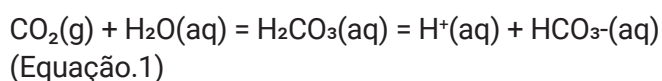


► Figura 4.28. Oportunidades de carbonatação mineral por utilização de rochas básicas e ultrabásicas.

#### 4.7.2. Técnicas de carbonatação mineral e meteorização estimulada

A carbonatação mineral é um processo geoquímico natural, relacionado com os processos de meteorização quando as fases silicatadas de Mg-Ca, presentes nas rochas máficas e ultramáficas, ficam em contato e reagem com o CO<sub>2</sub>, originando a cristalização de carbonatos. No ofiolito de Samail (Omã) observam-se taxas de carbonatação naturais com sequestro de 10<sup>4</sup> a 10<sup>5</sup> toneladas por ano de CO<sub>2</sub> atmosférico, convertido em carbonatos [9].

A conversão de CO<sub>2</sub> em carbonatos estáveis inicia-se com a solubilidade do CO<sub>2</sub> em fase aquosa, dissociação do ácido carbónico, libertação de prótons H<sup>+</sup> e diminuição do pH (Equação 1). Subsequentemente ocorre o consumo de H<sup>+</sup> por reação com as fases minerais silicatadas ricas em magnésio e cálcio, com libertação de catiões (Ca<sup>2+</sup> e Mg<sup>2+</sup>) e aumento do pH (Equações 2 a 4). Em condições adequadas de pH e de saturação, os catiões combinam-se com o hidrogenocarbonato e formam carbonatos (Equações 5 a 7).



A viabilidade da carbonatação mineral *in situ*, com injeção de CO<sub>2</sub> em rochas máficas extrusivas, nomeadamente basaltos vesiculares, foi demonstrada nos projetos piloto CarbFix (Islândia; [10]) e Wallula (EUA; [11]) e mais recentemente na operação CarbFix2 [12]. O projeto CarbFix, desde 2014, injetou mais de 105 toneladas de CO<sub>2</sub> dissolvido em água e demonstrou que a dissolução de CO<sub>2</sub> em água acelera a cinética das reações de carbonatação mineral para meses ou poucos anos e descarta a necessidade de extensas rochas de cobertura [13]. No entanto, este procedimento requer volumes de água na ordem das 25 toneladas de água por tonelada de CO<sub>2</sub> injetado [14].

O projeto InCarbon (Carbonatação *in situ* para redução de emissões de CO<sub>2</sub> de fontes energéticas e industriais no Alentejo) desenvolveu uma abordagem experimental inovadora de carbonatação mineral *in situ* [15]-[17], e investigou experimentalmente a reatividade de rochas máficas intrusivas, nomeadamente gabros provenientes das pedreiras de Montes Chãos (Sines; Maciço Ígneo de Sines) e Castelo Ventoso (Odivelas; Complexo Ígneo de Beja), com CO<sub>2</sub> dissolvido em água do mar em fase supercrítica a 8 MPa e 40 °C, tendo confirmado a reatividade desta tipologia de rochas com precipitação de dolomite [(Ca,Mg)CO<sub>3</sub>] conjuntamente com halite (NaCl). Apesar de reativos, em virtude de se tratar de rochas intrusivas, confirmou-se que a baixa porosidade das rochas gabróicas limita a sua utilização nos cenários de carbonatação *in situ*, por falta

área disponível para reagir com o CO<sub>2</sub>, mas abre perspectivas à sua utilização em processos *in situ* em que a rocha é extraída, britada e pulverizada antes de ser colocada em contacto com o CO<sub>2</sub>, eliminando os condicionalismos da falta de porosidade e permeabilidade.

A carbonatação mineral *in situ* é uma aplicação tecnológica, testada laboratorialmente no âmbito do projeto CO<sub>2</sub>MIN [18], e que pode ser utilizada a larga escala em centrais de carbonatação sob condições controladas de pressão e temperatura por volta dos 40 MPa e 500 °C. Nesta tecnologia, a reação do CO<sub>2</sub> pode ocorrer de forma direta com minerais silicatados de magnésio e cálcio, bem como com resíduos industriais alcalinos, podendo ser realizada em ambiente anidro (carbonatação gás-sólido) ou em soluções aquosas (carbonatação mineral aquosa direta) [19]. No caso da carbonatação mineral aquosa direta, o uso de pré-tratamentos como a ativação térmica e a redução de granularidade, potenciam a dissolução das fases minerais silicatadas necessárias à subsequente precipitação de carbonatos. A carbonatação *in situ* também pode ocorrer de forma indireta, envolvendo extração sequencial dos catiões presentes nos minerais silicatados com formação de óxidos e hidróxidos de cálcio e magnésio, que posteriormente contactam e reagem com o CO<sub>2</sub>, formando carbonatos [20], por vezes com elevado teor de pureza, o que os torna adequados de serem utilizados em aplicações industriais.

A meteorização estimulada é uma técnica que visa o aumento das taxas naturais de meteorização capazes de remover diretamente o carbono da atmosfera ou da hidrosfera, não necessitando de técnicas de captura de carbono a montante. As taxas naturais de meteorização podem ser incrementadas por: (1) utilização de rochas máficas e ultramáficas; (2) aumento da área de superfície mi-

neral por britagem e pulverização; (3) alteração do pH das soluções por adição de aditivos e catalisadores; (4) aumento de temperatura e pressão; (5) modificações nos fluxos hídricos de escorrência e escoamento; e (6) utilização de fitorremediadores capazes de fixar seletivamente catiões.

De entre as possibilidades capazes de estimular a taxas naturais de meteorização, *Hartmann et al.* [21] e *Montserrat et al.* [22] indicam a britagem, pulverização e dispersão de rochas máfica e ultramáficas em frações extremamente finas em solos, ou em áreas litorais e nos oceanos como uma estratégia bastante promissora de meteorização estimulada. A redução da granularidade das fases minerais das rochas máficas e ultramáficas, aumenta a área de contacto com o CO<sub>2</sub> atmosférico e/ou dissolvido em fase aquosa e acelera as reações químicas de dissolução mineral [23].

Quando dispersos nos solos, os silicatos pulverizados reagem diretamente com o CO<sub>2</sub> atmosférico, libertam catiões (Ca<sup>2+</sup> e Mg<sup>2+</sup>) estáveis e promovem o armazenamento de CO<sub>2</sub> através da cristalização de carbonatos. Para além da remoção do CO<sub>2</sub>, esta aplicação tem como vantagens incrementar a fertilidade dos solos ao promover a libertação de nutrientes, aumentar o pH, estabilizar a matéria orgânica e melhorar a retenção de água.

A adição de silicatos de Mg-Ca pulverizados em áreas litorais e nos oceanos aumenta a alcalinidade da água do mar e promove reações químicas, que incrementam os fluxos naturais de transferência de carbono da atmosfera para os oceanos [23]. A estimulação da meteorização possibilita que os oceanos aumentem a capacidade de absorção natural de CO<sub>2</sub> através do armazenamento sob a forma de moléculas de bicarbonato e carbonato dissolvidas, conduzindo a longo prazo ao armazenamento de CO<sub>2</sub> na forma de carbonato de cálcio precipitado

nos sedimentos oceânicos [24], [25]. Desta forma, a transformação do CO<sub>2</sub> dissolvido em carbonatos estáveis é considerada uma técnica de sequestro de carbono por remoção direta da atmosfera [8].

Conceptualmente o efeito da estimulação da meteorização e a consequente alcalinização dos oceanos, é comprovada por estudos teóricos desenvolvidos por *Hartmann et al.* [21], que mostram

que 1 g de olivina magnésiana pura, com granulidade entre 91-224  $\mu\text{m}$ , dissolvida em água do mar tem capacidade para sequestrar até 1,25 g de CO<sub>2</sub>, enquanto que Renforth [26] estima que à escala da geoengenharia são necessárias 7 toneladas de rochas ultramáficas para sequestrar cerca de 1 tonelada de carbono.

#### 4.7.3. Carbonatação mineral e meteorização estimulada aplicadas ao setor da pedra natural

De acordo com a base de dados do mercado de carbono da União Europeia (EU ETS) [27], o setor nacional da pedra natural, nas suas vertentes de exploração e transformação, não é considerado um emissor de larga escala. No entanto, no atual cenário de descarbonização da indústria e convergência para a neutralidade carbónica, todas as ações de redução ou mitigação de emissões de CO<sub>2</sub> devem ser consideradas.

Dada a escala de emissões de CO<sub>2</sub> resultantes da atividade do setor da pedra natural a carbonatação mineral *in situ* não é suscetível de ser aplicada ao armazenamento das suas emissões. A carbonatação *ex situ* e a meteorização estimulada, ainda em que em fase experimental, apresentam-se como técnicas de sequestro de carbono viáveis na redução e mitigação das emissões de CO<sub>2</sub> de fontes emissoras de média a pequena escala, mas que necessitam de fornecimento de matérias-primas minerais específicas.

A indústria de extração e transformação de rochas básicas e ultrabásicas produz resíduos (subprodutos) suscetíveis de carbonatação mineral *ex situ* e/ou de meteorização estimulada, potenciando a

sua circularidade e valorização. A utilização destes subprodutos nas técnicas de carbonatação mineral *ex situ* e/ou de meteorização estimulada tem potencial para sequestrar os volumes de CO<sub>2</sub> emitidos pela indústria de extração e transformação de rochas básicas e ultrabásicas, ou até mesmo para compensar as emissões de outros setores industriais de acordo com o conceito de emissões negativas de carbono.

No panorama nacional, a utilização de resíduos da indústria extrativa e transformadora de rochas máficas e ultramáficas e a sua consequente transformação em subprodutos de valor acrescentado, pode contribuir não só para a descarbonização do setor da pedra natural, além de se tornar um exemplo bem-sucedido de produção e consumo sustentável, em conformidade com os modelos de economia circular.

## Referências

- [1]. B. Metz, O. Davidson, H. C. de Coninck, M. Loos, and L. Meyer, *IPCC Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage*. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2005, 431 pp. Disponível em: [https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/srccs\\_wholereport-1.pdf](https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/srccs_wholereport-1.pdf)
- [2]. P. Friedlingstein, "Carbon cycle feedbacks and future climate change," *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, vol. 373, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1098/rsta.2014.0421>
- [3]. P. Hosseinnoosheri, S. A. Hosseini, V. Nuñez-López, and L. W. Lake, "Impact of field development strategies on CO<sub>2</sub> trapping mechanisms in a CO<sub>2</sub>-EOR field: A case study in the Permian Basin (SACROC unit)," *Int. J. Greenhouse Gas Control*, vol. 72, pp. 92–104, Mar. 2018.
- [4]. M. Tamura, "Climate Change Risk and Adaptation," in *Interlocal Adaptations to Climate Change in East and Southeast Asia*, T. Ito, M. Tamura, A. Kotera, and Y. Ishikawa-Ishiwata, Eds. Cham: Springer, 2022. doi: [https://doi.org/10.1007/978-3-030-81207-2\\_1](https://doi.org/10.1007/978-3-030-81207-2_1)
- [5]. D. S. Goldberg, T. Takahashi, and A. L. Slagle, "Carbon dioxide sequestration in deep-sea basalt," *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, vol. 105, pp. 9920–9925, 2008. doi: <https://doi.org/10.1073/pnas.0804397105>
- [6]. S. R. Gislason and E. H. Oelkers, "Carbon Storage in Basalt," *Science*, vol. 344, pp. 373–374, 2014. doi: <https://doi.org/10.1126/science.1250828>
- [7]. A. Sanna et al., "A review of mineral carbonation technologies to sequester CO<sub>2</sub>," *Chem. Soc. Rev.*, vol. 43, pp. 8049–8080, 2014. doi: <https://doi.org/10.1039/C4CS00035H>
- [8]. J. S. Campbell et al., *Measurements in Geochemical Carbon Dioxide Removal*. Heriot-Watt University, 2023. doi: <https://doi.org/10.17861/2GE7-RE08>
- [9]. P. B. Kelemen and J. Matter, "In situ carbonation of peridotite for CO<sub>2</sub> storage," *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, vol. 105, no. 45, pp. 17295–17300, 2008. doi: <https://doi.org/10.1073/pnas.0805794105>
- [10]. M. Druckenmiller and M. Maroto-Valer, "Carbon sequestration using brine of adjusted pH to form mineral carbonates," *Fuel Process. Technol.*, vol. 86, pp. 1599–1614, 2005. doi: <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2005.01.007>
- [11]. B. P. McGrail et al., "Injection and monitoring at the Wallula basalt pilot project," *Energy Procedia*, vol. 63, pp. 2939–2948, 2014.
- [12]. D. E. Clark et al., "CarbFix2: CO<sub>2</sub> and H<sub>2</sub>S mineralization during 3.5 years of continuous injection into basaltic rocks at more than 250 °C," *Geochim. Cosmochim. Acta*, vol. 279, pp. 45–66, 2020. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.gca.2020.03.039>
- [13]. S. Ó. Snæbjörnsdóttir and S. R. Gislason, "CO<sub>2</sub> storage potential of basaltic rocks offshore Iceland," *Energy Procedia*, vol. 86, pp. 371–380, 2016.
- [14]. S. Ó. Snæbjörnsdóttir et al., "Carbon dioxide storage through mineral carbonation," *Nat. Rev. Earth Environ.*, vol. 1, pp. 90–102, 2020.
- [15]. P. Moita et al., "Mineral carbonation of CO<sub>2</sub> in mafic plutonic rocks. II: Early-phase SC CO<sub>2</sub>-brine-rock interaction," *Appl. Sci.*, vol. 10, 5083, 2020.
- [16]. J. Pedro et al., "Mineral carbonation of CO<sub>2</sub> in mafic plutonic rocks, I – screening criteria and application to a case study in SW Portugal," *Appl. Sci.*, vol. 10, 4879, 2020.
- [17]. E. Berrezueta et al., "Laboratory experiments and modelling of the geochemical interaction of a gabbro-anorthosite with seawater and supercritical CO<sub>2</sub>: A mineral carbonation study," *Geoenergy Sci. Eng.*, vol. 228, 212010, 2023. doi: <https://doi.org/10.1016/j.geoen.2023.212010>
- [18]. S. Stopic et al., "Synthesis of magnesium carbonate via carbonation under high pressure in an autoclave," *Metals*, vol. 8, 993, 2018. doi: <https://doi.org/10.3390/met8120993>
- [19]. S. Yadav and A. Mehra, "A review on ex situ mineral carbonation," *Environ. Sci. Pollut. Res.*, vol. 28, pp. 12202–12231, 2021. doi: <https://doi.org/10.1007/s11356-020-12049-4>
- [20]. R. K. Saran and V. Arora, "CO<sub>2</sub> sequestration by mineral carbonation: A review," *Glob. Nest J.*, vol. 20, pp. 497–503, 2018. doi: <https://doi.org/10.30955/gnj.002597>
- [21]. J. Hartmann et al., "Enhanced chemical weathering as a geoengineering strategy to reduce atmospheric carbon



- dioxide, supply nutrients, and mitigate ocean acidification,” *Rev. Geophys.*, vol. 51, pp. 113–149, 2013. doi: <https://doi.org/10.1002/rog.20004>
- [22]. F. Montserrat et al., “Olivine dissolution in seawater: Implications for CO<sub>2</sub> sequestration through enhanced weathering in coastal environments,” *Environ. Sci. Technol.*, vol. 51, pp. 3960–3972, 2017. doi: <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acs.est.6b05942>
- [23]. D. S. Goll et al., “Potential CO<sub>2</sub> removal from enhanced weathering by ecosystem responses to powdered rock,” *Nature Geosci.*, vol. 14, pp. 545–549, 2021. doi: <https://doi.org/10.1038/s41561-021-00798-x>
- [24]. J. N. Cross et al., *Strategy for NOAA Carbon Dioxide Removal Research*. NOAA Special Report, 2023. doi: <https://repository.library.noaa.gov/view/noaa/52072>
- [25]. S. M. Smith et al., *The State of Carbon Dioxide Removal – 1st Edition*, 2023. doi: <https://doi.org/10.17605/OSF.IO/W3B4Z>
- [26]. P. Renforth, “The potential of enhanced weathering in the UK,” *Int. J. Greenh. Gas Control*, vol. 10, pp. 229–243, 2012. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2012.06.011>
- [27]. EU ETS, “European Union Emission Trading System—European Union Transaction Log.”





# 05.

## Análise de Custo e Benefício das Medidas, Técnicas e Tecnologias



## 5. Análise de Custo e Benefício das Medidas, Técnicas e Tecnologias

Francisco Lázaro, João Pedro Cardoso, Maria Margarida Vieira, Roberto Carlos Ribeiro, Cátia da Costa, Isabel Azevedo, Ricardo Barbosa

INEGI – Instituto de Ciência e Inovação em Engenharia Mecânica e Engenharia Industrial

### 5.1. Enquadramento

A transição energética deste setor deve estar alinhada com as metas nacionais de neutralidade carbónica e exige, por isso, um roteiro setorial que identifique oportunidades tecnológicas, avalie impactos económicos e defina uma trajetória de redução de emissões realista e compatível com as especificidades técnicas e operacionais das empre-

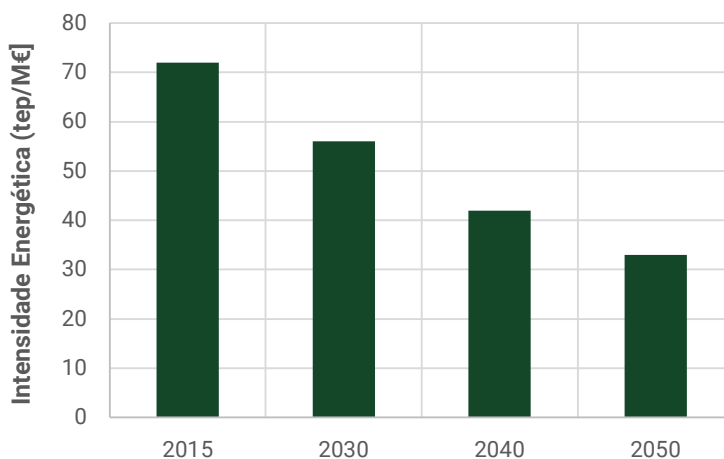
sas. Neste capítulo são apresentadas as trajetórias custo-eficazes de descarbonização para o setor da pedra natural, que tiveram por base os documentos estratégicos que orientam a transição energética nacional: o Plano Nacional de Energia e Clima 2030 (PNEC 2030) e o Roteiro para a Neutralidade Carbónica 2050 (RNC 2050).

#### 5.1.1. Evolução do uso de energia final até 2050

Segundo o Roteiro para a Neutralidade Carbónica 2050 é esperado que, até esse ano, exista uma redução significativa no consumo de energia final (EF), estimada entre 22% a 25% em relação a 2015, juntamente com uma redução de mais de 50% na intensidade energética. Prevê-se a crescente eletrificação dos processos, com mais de 65% do consumo de EF proveniente de eletricidade já em 2030 e continuando a aumentar até 2050. Esse processo será acompanhado por uma maior integração de

fontes de energia renováveis no consumo de energia final, substituindo progressivamente os produtos petrolíferos, cujo consumo será drasticamente reduzido. Essa transformação contribuirá para um futuro energético mais sustentável e eficiente [1].

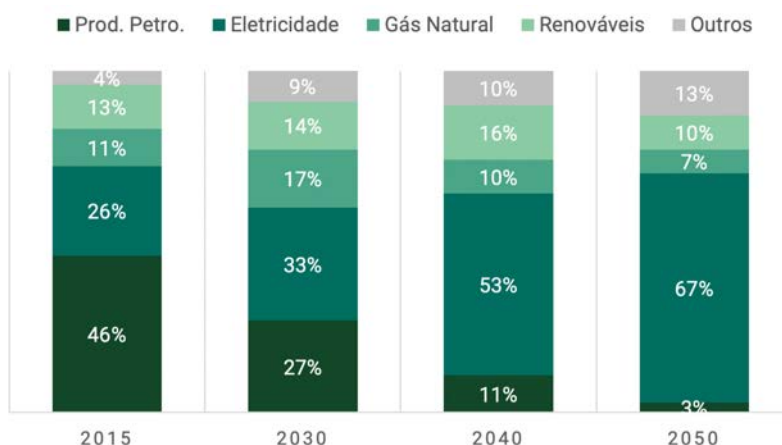
Na Figura 5.1 é possível observar a previsão de redução da intensidade energética em Portugal até 2050.



► Figura 5.1. Níveis de intensidade energética entre 2015 e 2050, em tep/M€ [1].

Relativamente aos vetores energéticos (renováveis e não renováveis) utilizados nos mais diversos setores (como eletricidade, gás natural, produtos petrolíferos, etc.), é importante destacar que a análise da previsão de evolução futura dessas fontes de energia revela tendências diferenciadas por vetor

energético. A Figura 5.2 apresenta a previsão de evolução do peso dos diferentes vetores energéticos no consumo de energia final, com base na projeção do Roteiro para a Neutralidade Carbónica 2050 [1], [2].



► Figura 5.2. Evolução do peso dos diferentes vetores no consumo de energia final total para Portugal, de acordo com o RNC, cenário pelotão

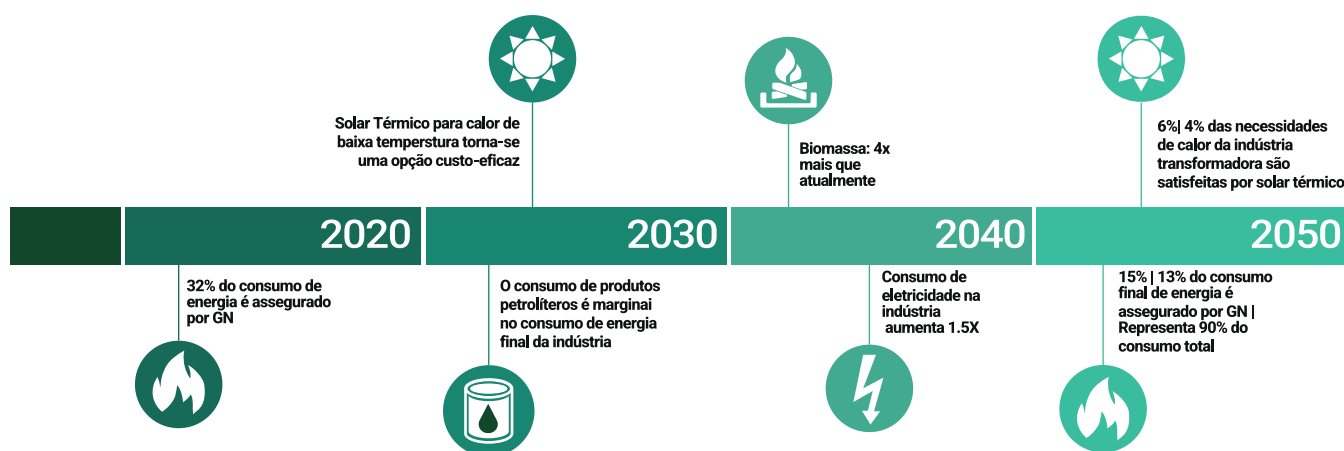
O Roteiro prevê, em ambos os cenários, a eletrificação gradual de uma parte significativa dos usos de energia, com a eletricidade a atingir um peso de 67% do consumo total de energia final em Portugal, em 2050. Contrariamente, o consumo de produtos petrolíferos reduz de forma drástica, correspondendo a cerca de 3% em 2050, e o gás natural também

perde relevância. Além disso, vetores de base renovável como a biomassa, o calor com recurso a tecnologia solar térmica e geotérmica, mantêm o seu peso no mix energético, sendo que o uso da biomassa enquanto vetor energético reduz em termos absolutos.

### 5.1.2. Evolução do consumo de energia final do setor industrial até 2050

Até 2050, o consumo de energia final na indústria deverá sofrer uma evolução significativa, impulsionada por medidas como a eletrificação ou o uso de biomassa, ambos essenciais para a descarbonização do setor. Em 2050 espera-se que 90% do consumo de gás natural do país ocorra no setor industrial, destacando a importância desse recurso energético na matriz industrial.

No entanto, a descarbonização no setor industrial ocorrerá a um ritmo mais lento do que em outros setores, resultando num aumento proporcional das emissões industriais no total do país, que representarão 39% das emissões em 2050. Esse desafio exigirá não apenas soluções tecnológicas inovadoras, mas também uma transformação nos modelos de negócio atuais, adaptando-se a um cenário de crescente exigência por sustentabilidade e eficiência energética [1], [2].



► Figura 5.3. Evolução do consumo de energia final na indústria até 2050 [1].

Espera-se que a implementação de práticas de produção mais sustentáveis, bem como a digitalização e automação dos processos industriais, contribua para uma diminuição substancial do consumo de energia. Além disso, políticas governamentais e re-

gulamentações ambientais mais rigorosas deverão acelerar essa transição, promovendo desta forma um futuro industrial mais sustentável e energeticamente eficiente.



## 5.2. Caracterização do Uso de Energia no Setor da Pedra Natural

O setor da pedra natural em Portugal apresenta uma cadeia de valor com duas grandes atividades produtivas: a extração em pedreiras e a transformação industrial em serrarias, centros de corte e acabamentos. Cada etapa possui perfis energéticos distintos, refletindo diferenças nos equipamentos utilizados, nas intensidades de operação e nos requisitos tecnológicos dos materiais. Em termos gerais, o setor é caracterizado por um consumo energético relevante, embora com variações significativas entre empresas de pequena, média e gran-

de escala, bem como entre tipos de pedra (granito, calcário, mármore, ardósia, etc.).

Através da recolha de informação junto de diversos *stakeholders* tais como associações setoriais, tecnólogos e empresas do setor, elaborou-se a desagregação dos consumidores de energia (entre “Combustíveis fósseis” e “Eletricidade”) para ambas as etapas. Os resultados obtidos serão caracterizados nas subsecções seguintes.

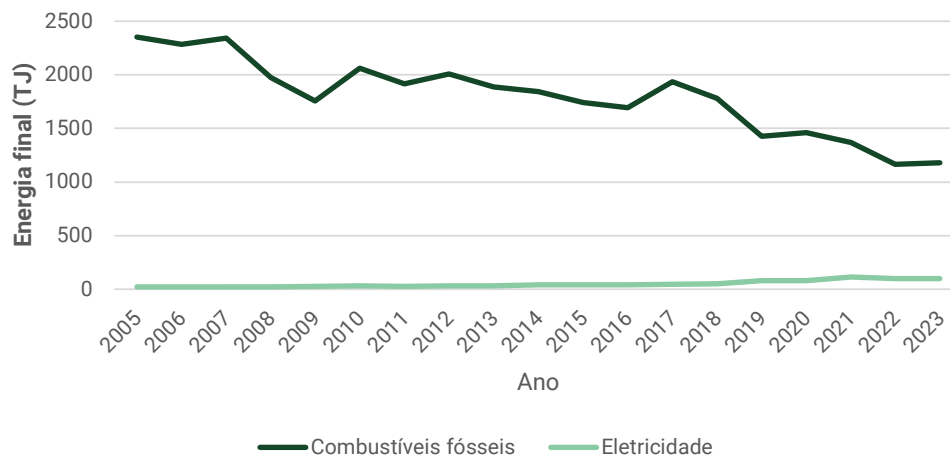
### 5.2.1. Extração

A etapa de extração tende a apresentar uma maior dependência de combustíveis fósseis, dada a predominância de equipamentos móveis utilizados em ambiente exterior. Os consumos energéticos são tipicamente associados a:

- escavadoras e pás carregadoras (gasóleo);
- perfuradoras (gasóleo);
- corte primário de bloco através de máquina de fio (geralmente elétricos ou híbridos);

- transporte interno e movimentação de blocos (gasóleo);
- bombagem de água (gasóleo).

Na Figura 5.4 é apresentada a evolução histórica, de 2005 a 2023, do consumo energético para extração, de acordo com os vetores energéticos utilizados.



► Figura 5.4. Evolução do uso de energia final para extração, de 2005 a 2023, pelos vetores energéticos utilizados [3].

Como se observa na Figura 5.4, a dependência dos combustíveis fósseis na extração tem vindo a diminuir, de forma genérica, ao longo dos anos. Por outro lado, tem existido um ligeiro aumento do uso

de eletricidade, que, no entanto, não é proporcional à redução verificada nos combustíveis fósseis pelo que, de forma geral, o consumo de energia final da extração tem vindo a diminuir ao longo dos anos.

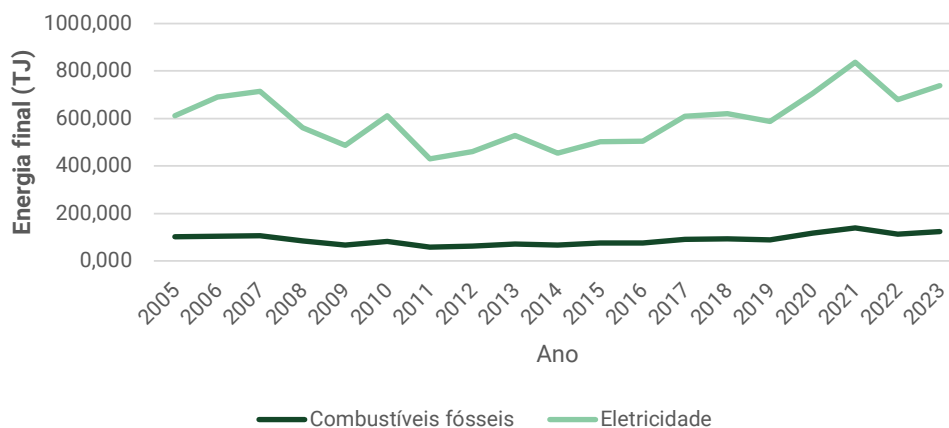
## 5.2.2. Transformação

A etapa de transformação é mais eletricamente intensiva, se comparada com a de extração, devido ao funcionamento de maquinaria industrial. Entre os principais processos e equipamentos incluem-se:

- serragem de blocos (serras de fio diamantado - eletricidade);
- corte e retificação (serras de disco, cortadoras CNC - eletricidade);
- polimento e acabamento superficial (polidoras automáticas - eletricidade);

- secagem e tratamento de superfícies (fornos ou túneis, quando aplicável - eletricidade);
- sistemas auxiliares (bombas de água para refrigeração, compressores de ar, ventilação - eletricidade).

A figura seguinte apresenta a evolução do uso de energia final destinado à Transformação de 2005 a 2023, discriminada pelos vetores energéticos utilizados (Combustíveis fósseis e Eletricidade).



► Figura 5.5. Evolução do uso de energia final para transformação, de 2005 a 2023, pelos vetores energéticos utilizados [3].

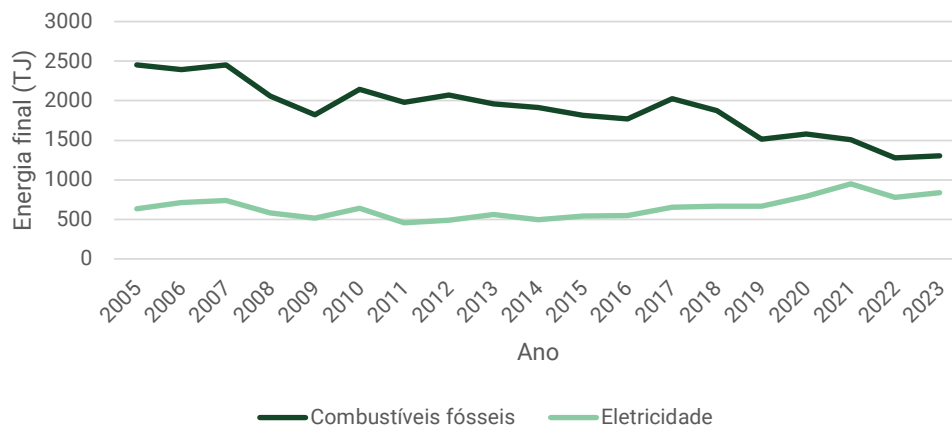
Em termos de evolução do consumo de energia final no setor da Transformação, de acordo com a Figura 5.5 observa-se, para ambos os vetores, um ligeiro decréscimo do consumo entre 2007 e 2012, provavelmente associado à crise económica, seguida de uma recuperação nos anos seguintes, que, de

forma geral, se tem mantido constante até à atualidade (2023). Além disso, pela figura é também possível observar a maior dependência da eletricidade que este setor apresenta em comparação com a Extração.

### 5.2.3. Caracterização geral

Tendo como base a caracterização atrás apresentada, por subsetor e tendo em conta que a modelação energética (conducente à identificação das trajetórias custo-eficaz para a descarbonização do setor) foi realizada de forma agregada (considerando as etapas de extração e transformação), optou-se por,

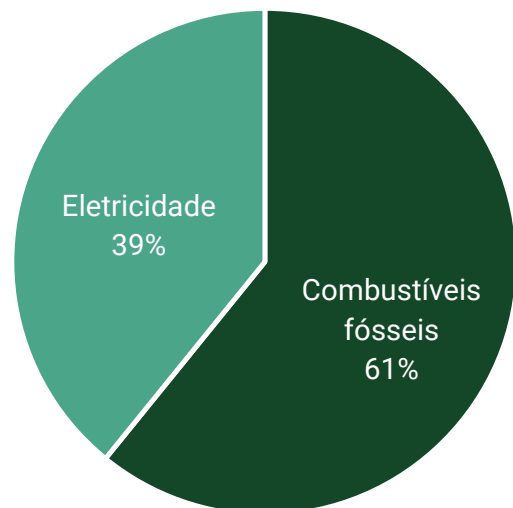
na presente fase de caracterização do uso energético do setor, integrar os dois exercícios e apresentar o uso total de energia final do setor, como apresentado na Figura 5.6.



► Figura 5.6. Evolução do uso de energia final total para etapas de extração e transformação para o setor da pedra natural, de 2005 a 2023, pelos vetores energéticos utilizados [3].

Assim, em termos globais do setor da pedra natural, verifica-se que o consumo de combustíveis fósseis apresenta, desde 2005, em termos médios, uma tendência de decréscimo, enquanto a eletricidade apresenta uma tendência de aumento.

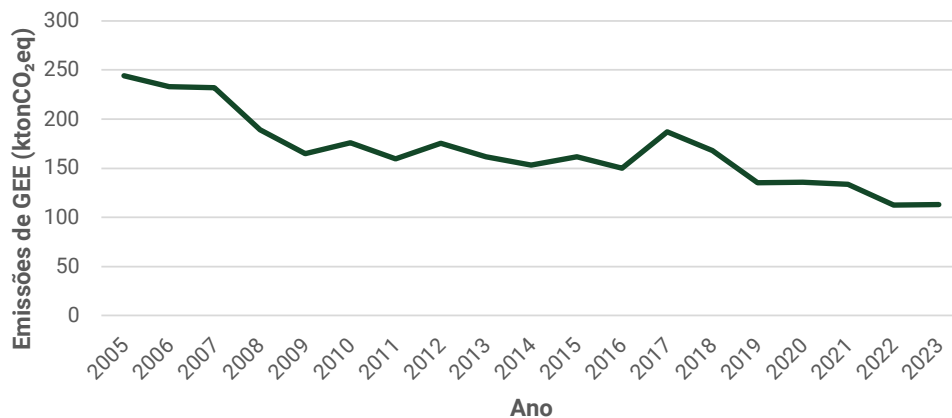
Em termos de repartição energética para as etapas de extração e transformação, no ano base de 2023, verifica-se que a eletricidade tem, assim, um peso de 39% do consumo de EF e os combustíveis fósseis no seu global têm um peso de 61%, conforme representado na Figura 5.7.



► Figura 5.7. Distribuição de consumo de energia final por vetor energético, referente ao ano de 2023, para o setor da pedra natural [3].

No que respeita às emissões de Gases com Efeito de Estufa (GEE) resultantes da atividade e consumo de energia do setor (Figura 5.6), a Figura 5.8 apre-

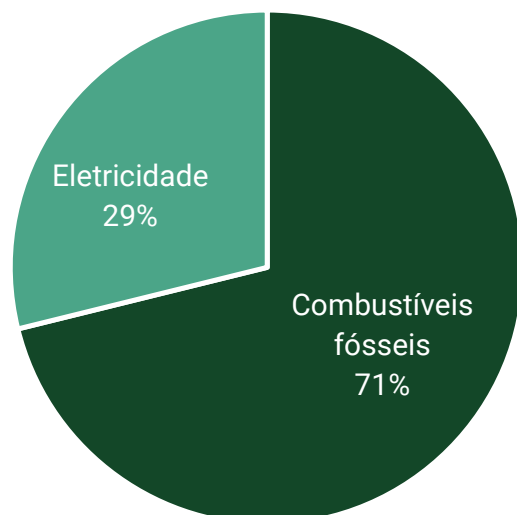
senta a evolução global (extração e transformação) dessas emissões para o setor da pedra natural, de 2005 a 2023.



► Figura 5.8. Evolução das emissões de GEE para etapas de extração e transformação para o setor da pedra natural, de 2005 a 2023 [3].

Como é possível observar, o setor da pedra natural tem seguido um percurso de redução das emissões de GEE desde 2005, registando uma diminuição de 53% entre 2005 e 2023.

No que toca à repartição das emissões estimadas para o global do setor da pedra natural, apresentam-se na Figura 5.9 os valores para o ano base de 2023, em que se observa que a eletricidade é responsável por 29% das emissões totais, enquanto os combustíveis fósseis, no seu conjunto, representam 71% das emissões.

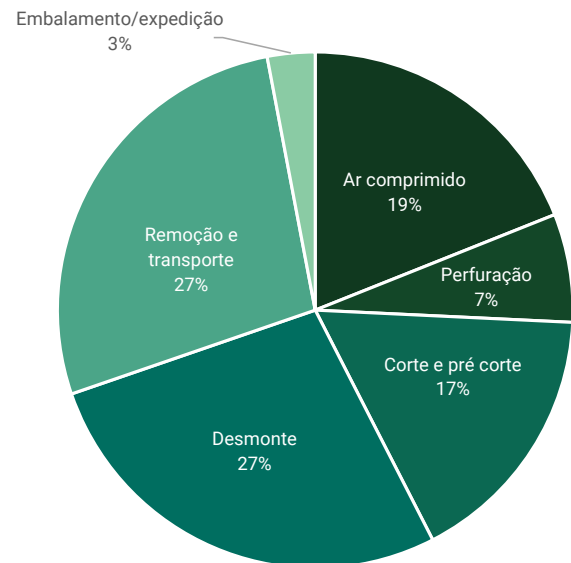


► Figura 5.9. Distribuição das emissões de GEE por vetor energético, referentes ao ano de 2023, para o setor da pedra natural [2].

### 5.2.4. Desagregação do uso de energia por tecnologia

De forma a viabilizar uma correta modelação das trajetórias custo-eficazes para o setor, nos horizontes 2030, 2040 e 2050, foi necessário obter a desagregação do consumo de energia por cada processo tecnológico. Contudo, devido à indisponibilidade de uma base de dados consolidada ou de informação oficial que detalhe esta desagregação, recorreu-se ao contacto com tecnólogos do setor, bem como à consulta de trabalhos anteriores realizados pelo INEGI e que permitiram obter uma visão geral do setor. Assim, com vista a facilitar a análise e garantir a produção de resultados fiáveis e representativos, optou-se por modelar os subsetores da extração e da transformação de forma agregada. Tal abordagem justifica-se ainda pelo facto de muitos dos processos industriais estarem envolvidos em ambas as etapas e apresentarem semelhanças, podendo ser agrupados nas seguintes categorias: remoção e transporte, corte e pré-corte, perfuração, ar comprimido, embalagem e expedição.

Assim, com base nas informações obtidas, foi possível estimar a desagregação do uso de energia por tecnologia, conforme apresentado na Figura 5.10, em que se pode observar a maior representatividade dos processos de remoção e transporte e do desmonte.



► Figura 5.10. Distribuição do consumo de energia final por processo de fabricação das etapas de extração e transformação para o setor da Pedra Natural.



### 5.3. Principais Vetores e Tecnologias Custo-eficazes para a Descarbonização

A descarbonização do setor da pedra natural exige uma abordagem integrada que considere as especificidades das suas duas principais etapas produtivas - extração e transformação - e as limitações tecnológicas e operacionais associadas a cada uma. Nesta secção identificam-se as tecnologias e vetores energéticos com maior potencial de redução de emissões, distinguidos entre medidas transversais ao setor e soluções específicas para cada subsetor.

A identificação destas soluções resulta da análise dos perfis energéticos atuais, da evolução tecnológica expectável até 2050 e das tendências de mercado dos vetores energéticos alternativos. De

forma geral, as principais oportunidades de descarbonização agrupam-se nas seguintes categorias:

- eficiência energética de equipamentos e processos;
- eletrificação total ou parcial das operações;
- substituição de combustíveis fósseis por alternativas renováveis;
- produção descentralizada de eletricidade com base em fontes renováveis de energia.

#### 5.3.1. Tecnologias de descarbonização

A implementação de soluções tecnológicas de eficiência energética e de otimização de processos constitui a medida com maior impacto no curto prazo, com elevado grau de maturidade tecnológica e sem necessidade de mudanças estruturais no processo produtivo.

As principais oportunidades incluem:

- substituição de compressores por modelos de alta eficiência;
- renovação de equipamentos em fim de vida útil;
- automatização e controlo avançado de processos;
- redução de perdas e consumos em vazio através de sistemas inteligentes.

Estas medidas permitem reduzir consumos em ambos os subsectores e representam ganhos imediatos de custo e de emissões.

- Em concreto, no que respeita ao subsetor da extração, as principais soluções tecnológicas/boas práticas para promoção da eficiência energética são:
- renovação de compressores, responsáveis, em muitas das pedreiras, por mais de 25% do consumo energético da etapa de extração;
- otimização de ciclos operacionais;
- implementação de soluções de eletrificação parcial de equipamentos;
- implementação de sistemas de monitorização e gestão do uso de energia em tempo real.

Por sua vez, não subsetor da transformação (que apresenta um perfil energético dominado pela eletricidade, o que facilita soluções de baixo carbono), as oportunidades incluem:

- polidoras, serras e equipamentos CNC com melhor relação potência/produção;
- sistemas de velocidade variável em compressores e bombas;
- otimização de linhas de produção.

Adicionalmente, a adoção de tecnologias de eletrificação (parcial ou total de processos) será uma das alavancas de descarbonização do setor (não

só devido ao fator de emissão em si como também devido ao rendimento associado à conversão de energia, que é superior quando se usam tecnologias de eletrificação de processos), especialmente relevante no contexto da rápida descarbonização do sistema elétrico nacional prevista no PNEC 2030 e RNC2050.

Por fim a instalação de sistemas fotovoltaicos apresenta elevada aplicabilidade em ambos os subsetores, dado o elevado consumo elétrico e o espaço disponível em muitos parques industriais e pedreiras.

### 5.3.2. Vetores de descarbonização

No caso dos vetores energéticos, foi realizada uma análise de sensibilidade considerando todos os vetores de descarbonização passíveis de integração no setor, com foco nas etapas de extração e transformação para o setor da pedra natural. Foram incluídos os seguintes vetores: eletricidade, gásóleo, biodiesel e HVO.

Para além da identificação dos vetores energéticos relevantes para o setor da pedra natural, procedeu-se igualmente à avaliação da sua aplicabilidade no horizonte temporal até 2050. Esta análise teve em conta a evolução esperada da disponibilidade de cada vetor, o grau de maturidade tecnológica, a adequação aos processos específicos de extração e transformação, e a evolução das condições de mercado. Assim, para cada vetor energético foi estimada a sua probabilidade de integração ao longo das próximas décadas, permitindo antecipar o seu

papel potencial na trajetória de descarbonização do setor.

Com os vetores previamente identificados, procedeu-se a uma análise de sensibilidade em termos de disponibilidade, evolução dos preços e das emissões associadas, de modo a avaliar a sua viabilidade económica e ambiental no horizonte de modelação:

- A eletricidade destaca-se como o vetor energético mais estável e sustentável, com um uso crescente impulsionado pela expansão das energias renováveis. No entanto, a eletrificação total ainda apresenta limitações, sobretudo em pedreiras remotas, onde são utilizadas máquinas pesadas e pode existir falta de capacidade da rede elétrica para satisfazer os requisitos de carregamento das baterias;

- O gasóleo continua a ser o combustível principal devido à sua ampla disponibilidade, contudo, as suas limitações ambientais levarão a uma redução gradual do seu uso;
- O biodiesel ainda apresenta baixa disponibilidade, embora possa ser utilizado em motores convencionais com poucas adaptações, geralmente através de misturas com gasóleo. À medida que a cadeia de valor deste combustível se fortalecer, espera-se um aumento da sua oferta no mercado;
- O HVO, também conhecido como diesel renovável, surge como uma das soluções mais promissoras. Pode ser utilizado diretamente nos motores existentes, sem necessidade de modificações, oferecendo o mesmo desempenho e facilidade de armazenamento que o gasóleo convencional. É esperado que a sua produção, baseada em óleos residuais e gorduras animais, irá crescer nos próximos anos.

Os resultados encontram-se sumarizados na Tabela 5.1.

Vetor energético	Disponibilidade atual	Disponibilidade futura	Adequação ao setor
Eletricidade	Alta	Aumenta	Ideal para máquinas fixas e novas soluções móveis
Gasóleo	Muito alta	-	Essencial para máquinas pesadas
Biodiesel	Baixa ( Pouca produção para a procura)	Aumenta	Alternativa parcial uma vez que os equipamentos necessitam de alteração
HVO	Não existe	A partir de 2030	Substituição direta do gasóleo

► Tabela 5.1. Disponibilidade de cada vetor energético.

Em conclusão pode-se referir que a análise dos vetores energéticos evidencia que a descarbonização do setor da pedra natural dependerá, em grande medida, da forma como o setor electroprodutor e a disponibilidade dos combustíveis renováveis evoluem ao longo das próximas décadas.

Entre estes vetores, a eletricidade destaca-se como o pilar central da transição energética, não apenas pelo seu peso atual no consumo do setor, mas so-

bretudo pela tendência de profunda descarbonização do sistema electroprodutor nacional prevista no PNEC 2030 e no RNC 2050.

O reforço da eletrificação dos processos – complementado pela produção descentralizada de energia renovável, como o fotovoltaico para autoconsumo – constitui uma das medidas mais eficazes e imediatas para reduzir emissões. Contudo, a eletrificação total é limitada por fatores operacionais e pela

própria natureza dos equipamentos utilizados, especialmente na extração, onde a maquinaria pesada continua a depender de vetores líquidos.

Neste contexto, a transição energética do setor assenta numa combinação equilibrada entre eletrificação, eficiência energética, produção renovável descentralizada e substituição progressiva do ga-

sóleo por biodiesel e HVO, cuja maturidade tecnológica e disponibilidade aumentarão gradualmente até 2050.

As secções que se seguem aprofundam esta evolução, começando pelo papel estruturante da eletricidade e seguida da análise dos vetores específicos em cada subsetor.

### 5.3.2.1. O papel da eletricidade de base renovável

A eletricidade desempenha um papel fundamental na transição energética do setor da pedra natural, contribuindo para a redução das emissões de gases com efeito de estufa (GEE) e para uma produção mais sustentável, uma vez que a crescente eletrificação dos processos produtivos per-

mite substituir fontes fósseis por energia limpa e eficiente. Na Tabela 5.2 é apresentada a evolução e tendência de eletrificação até 2050, destacando-se a descarbonização do mix energético da rede elétrica e o aumento da produção fotovoltaica para autoconsumo.

Vetor energético	2025- 2030	2030 - 2035	2035 - 2040	2040 - 2045	2045 - 2050
Descarbonização do mix energético da rede elétrica	●	●	◐	◑	◑
Produção fotovoltaica para autoconsumo	●	●	◐	◑	◑

○ Não utilizado  
 ◐ Aplicação baixa  
 ◑ Aplicação média  
 ◒ Aplicação elevada  
 ● Completamente difundido

► Tabela 5.2. Evolução/tendência de eletrificação do setor da pedra natural até 2050.

O setor da pedra natural é caracterizado pelo peso significativo da eletricidade no consumo global de energia e das emissões de GEE daí resultantes. De acordo com o PNEC 2030 e com o RNC 2050, perspectiva-se, na próxima década, um elevado potencial de descarbonização do sistema electroprodutor nacional, impulsionado pelo rápido crescimento da incorporação de fontes renováveis no mix energético, o que impulsionará, por consequência a descarbonização do setor da pedra natural. No entanto, à medida que a rede elétrica se torna progressivamente mais limpa, o ritmo de descarbonização da eletricidade desacelera, reduzindo o impacto adicional desta medida na diminuição das emissões. Assim, entre 2040 e 2050, o seu contributo para a redução de emissões no setor, torna-se significativamente mais limitado [1], [2].

Tendo em conta o elevado consumo de eletricidade do setor, existe um potencial considerável para a instalação de nova capacidade de produção fotovoltaica, tirando partido do espaço disponível nas imediações das instalações para produzir eletricidade destinada a autoconsumo. Esta solução permite reduzir a dependência da eletricidade da rede e acelerar a descarbonização da eletricidade utilizada. Sendo uma tecnologia madura, amplamente disponível e de rápida implementação, o seu potencial de aplicação e, conseqüentemente, de redução de emissões é particularmente elevado no curto

prazo (2025-2035). No entanto, este potencial tende a sofrer uma saturação progressiva, à medida que o espaço disponível vai sendo progressivamente menor, resultando num potencial de descarbonização mais reduzido entre 2040 e 2050.

Tendo sido identificados os vetores energéticos e o seu potencial de aplicação transversal ao setor, importa agora analisar de forma diferenciada a sua relevância e viabilidade nas duas etapas principais da cadeia de valor da pedra natural: extração e transformação, uma vez que cada subsetor apresenta características operacionais, perfis de consumo e limitações tecnológicas distintas, que determinam o ritmo e a profundidade possíveis da transição energética.

Assim, as secções seguintes detalham a evolução esperada dos vetores energéticos e das tecnologias de descarbonização em cada subsetor, considerando o seu contexto atual, o grau de maturidade tecnológica disponível, as barreiras existentes e o potencial real de adoção até 2050.

### 5.3.2.2. Vetores de descarbonização da extração de pedra natural

Na extração de pedra natural, a transição energética até 2050 será impulsionada pela adoção de soluções mais sustentáveis e eficientes. A Tabela

5.3 apresenta a tendência esperada para cada vetor energético até 2050 para extração de pedra natural.

Vetor energético	2025- 2030	2030 - 2035	2035 - 2040	2040 - 2045	2045 - 2050
Eficiência energética					
Biodiesel					
HVO					
Eletrificação (parcial ou total de processos)					

Não utilizado   
 Aplicação baixa   
 Aplicação média   
 Aplicação elevada   
 Completamente difundido

► Tabela 5.3. Evolução/tendência dos vetores energéticos até 2050 para extração de pedra natural

Nas atividades de extração de pedra natural a eficiência energética dos equipamentos assume um papel crucial na redução do consumo energético e, conseqüentemente, das emissões de GEE associadas. Destacam-se, em particular, os compressores, equipamentos responsáveis por consumos elevados (superior a 1/4 do consumo nas atividades de extração) e que apresentam um elevado potencial de melhoria. A substituição por modelos mais recentes e energeticamente mais eficientes representa uma oportunidade significativa de redução de consumos. Em termos de trajetória até 2050, a eficiência energética revela um elevado potencial de redução de emissões no curto prazo, impulsionado pela substituição de equipamentos atualmente em fim de vida útil. Este potencial tende a aumentar até cerca de 2035, à medida que ocorrem investimentos na modernização do parque tecnológico e que o nível de maturidade das tecnologias mais eficientes aumenta. Nos restantes anos, o impacto adicional desta medida tende a diminuir.

O gásóleo tem ainda um peso significativo no sub-setor, sobretudo em maquinaria pesada, sendo por isso outro dos focos de atuação para a redução de emissões. Esta redução passa essencialmente pela substituição deste combustível por alternativas mais limpas, como o biodiesel e o HVO. No caso do biodiesel, estima-se que o potencial de redução seja limitado no curto prazo, dada a sua adoção recente, mas a partir de 2030, com a maturidade do mercado, o seu contributo torna-se progressivamente mais relevante, mantendo-se elevado até 2050. Já o HVO, cuja produção verde e utilização ainda não atingiram uma maturidade significativa, deverá revelar um potencial mais expressivo a partir de 2035, com a sua progressiva introdução no mercado.

Adicionalmente, a eletrificação de processos, embora com um impacto mais moderado, assume também um papel importante, nomeadamente na substituição de equipamentos a gásóleo (como compressores e equipamentos de transporte de blocos dentro das pedreiras) por soluções elétricas.

### 5.3.2.3. Vetores de descarbonização da transformação de pedra natural

À semelhança da extração, na transformação de pedra natural a transição energética até 2050 será impulsionada pela adoção de soluções mais sustentáveis, como o uso de biodie-

sel e HVO, e por equipamentos mais eficientes. A Tabela 5.4 apresenta a tendência dos vetores energéticos até 2050 para transformação de pedra natural.

Vetor energético	2025- 2030	2030 - 2035	2035 - 2040	2040 - 2045	2045 - 2050
Eficiência energética					
Biodiesel					
HVO					

Não utilizado  
 Aplicação baixa  
 Aplicação média  
 Aplicação elevada  
 Completamente difundido

► Tabela 5.4. Evolução/tendência dos vetores energéticos até 2050 para Transformação da pedra natural.

A eficiência energética desempenha um papel fundamental também na descarbonização das atividades de transformação de pedra natural. A substituição por equipamentos mais recentes e eficientes representa uma oportunidade relevante de redução de consumos e, conseqüentemente, das emissões de GEE. Até 2050, o potencial de redução é particularmente elevado no curto prazo, impulsionado pela renovação de equipamentos em fim de vida útil e pelos investimentos em modernização até cerca de 2035. Após esse período, à semelhança do que se prevê para as atividades de Extração, o impacto da eficiência energética tende a reduzir progressivamente, à medida que o parque tecnológico se torna maioritariamente eficiente.

No âmbito da substituição de vetores, e tal como na extração, o biodiesel e o HVO surgem como alternativas ao gásóleo. Contudo, neste caso com menor potencial de descarbonização uma vez que a utilização de gásóleo tem menor expressão nas atividades de transformação, quando comparado com a extração. Os dois vetores apresentam um potencial crescente até 2050, ainda que limitado no curto prazo devido a constrangimentos de mercado e à maturidade tecnológica da sua produção e utilização, conforme já referido no caso da extração de pedra natural.



## 5.4. Propostas de Trajetórias de Redução de Emissões de GEE do Setor da Pedra Natural

Nesta secção apresentam-se as trajetórias de descarbonização desenvolvidas para o setor da pedra natural, resultantes do processo de modelação energética. Para este efeito, recorreu-se ao modelo energético *Open Source Energy Modeling System (OSeMOSYS)*, uma ferramenta amplamente utilizada na análise de sistemas energéticos, que possibilita simular de forma integrada diferentes combinações tecnológicas e de vetores energéticos e avaliar o impacto em termos económicos e ambientais.

A construção das trajetórias de emissões assentou em pressupostos fundamentais relativos à evolução do consumo de energia e aos custos operacionais (OPEX). Estes pressupostos fornecem a base para a análise prospetiva e asseguram consistência entre cenários, permitindo que os resultados reflitam de forma realista as tendências esperadas e as oportunidades de descarbonização do setor da pedra natural.

Assim, foi desenvolvido um modelo específico para o setor que integra três cenários de evolução distintos: BAU, Conservador e Acelerado. O cenário BAU representa a continuidade das práticas atuais. O cenário Conservador incorpora melhorias progressivas, apoiados em novos vetores energéticos e medidas de eficiência, mas sem aplicação das taxas de carbono. O cenário Acelerado identifica o conjunto ótimo de vetores energéticos capaz de minimizar o custo operativo do sistema enquanto maximiza a redução das emissões de GEE, permitindo compreender qual a trajetória economicamente mais vantajosa para alcançar os objetivos.

A análise comparativa destes cenários oferece uma visão clara do potencial de mitigação do setor da pedra natural das emissões de GEE ao longo do horizonte temporal considerado.

### 5.4.1. Metodologia adotada – Modelo energético - OSeMOSYS

O *Open Source Energy Modeling System (OSeMOSYS)* é um modelo de otimização de sistemas energéticos amplamente utilizado no planeamento energético de longo prazo. A sua flexibilidade, tanto na definição das fronteiras do sistema como na caracterização de vetores energéticos, tecnologias, custos e metas, torna-o particularmente adequado para análises setoriais [4]. No contexto da indústria da pedra natural, o OSeMOSYS permite avaliar a evolução futura do setor, considerando quer os processos produtivos, quer o consumo de energia útil. O objetivo central da sua aplicação é identificar trajetórias de transição, capazes de orientar o setor no processo de descarbonização e no cumprimento

dos compromissos climáticos, através da redução das emissões de gases com efeito de estufa ao longo da cadeia de valor.

Neste estudo, o modelo é utilizado para simular a evolução do sistema energético da indústria da pedra natural entre 2023 e 2050. Pretende-se identificar soluções/vetores energéticos que assegurem o fornecimento de energia em conformidade com as necessidades do setor, ao mesmo tempo que minimizam os custos operacionais garantem o cumprimento das metas de descarbonização do sistema ao longo de todo o horizonte de modelação.

A estrutura do modelo assenta em vários elementos fundamentais:

- projeção das necessidades energéticas por processo, expressas em termos de energia útil;
- disponibilidade e preços previstos dos diferentes vetores energéticos;
- metas de descarbonização a curto, médio e longo prazo.

Adicionalmente, podem ser incorporadas restrições que reflitam limitações reais, como barreiras de investimento, indisponibilidade de determinadas tecnologias em escala industrial ou limites de for-

necimento de vetores específicos, como o hidrogénio. A inclusão destas restrições contribui para uma representação mais realista do sistema energético simulado.

Importa salientar que os resultados do OSeMOSYS dependem fortemente da qualidade, disponibilidade e atualidade dos dados de entrada, bem como dos pressupostos adotados. As projeções não devem ser interpretadas como previsões determinísticas, mas sim como cenários exploratórios, associados a um grau inerente de incerteza. Deste modo, os resultados constituem orientações para apoiar a tomada de decisão e a definição de estratégias, e não garantias quanto à evolução futura do setor.

#### 5.4.2. Pressupostos assumidos

Os vetores energéticos integrados no modelo correspondem aos identificados e caracterizados nas secções anteriores, nomeadamente eletricidade, gasóleo, biodiesel e HVO. Estes vetores foram selecionados por representarem, simultaneamente, a realidade atual do setor e as alternativas tecnológicas com maior potencial de integração até 2050, tendo em conta a sua maturidade, disponibilidade e adequabilidade às operações de extração e transformação de pedra natural.

No que respeita aos custos de investimento associados às tecnologias de eletrificação de processos, em particular no subsector de extração, não foi possível estabelecer estimativas robustas. Isto deve-se ao facto de a eletrificação destes processos não corresponder a uma substituição direta (*'like-for-like'*) dos equipamentos atualmente utilizados, mas sim à adoção de soluções tecnológicas com funcionalida-

des distintas, níveis de potência diferenciados ou integrações operacionais que variam consoante o tipo de pedra, método de desmonte e perfil produtivo.

Acresce ainda que muitas das alternativas elétricas aplicáveis à maquinaria pesada – perfuradoras, escavadoras, sistemas de movimentação e geração de ar comprimido – encontram-se numa fase de desenvolvimento ou demonstração, não existindo ainda custos comerciais estabilizados, nem linhas de mercado que permitam uma comparação direta com as tecnologias convencionais a gasóleo.

Por este motivo, e para assegurar a consistência da modelação, o modelo OSeMOSYS foca-se apenas nos custos operacionais (OPEX) dos vetores energéticos, não integrando custos de capital (CAPEX) e operacional (OPEX) associados a tecnologias de uso final de energia.

### 5.4.2.1. Evolução da procura de energia útil

Além de ser importante ter uma correta caracterização energética do setor para o ano base (como apresentado na Figura 5.6), um dos aspetos mais sensíveis na modelação energética do setor da pedra natural consiste na estimativa de evolução da procura de energia útil para os próximos anos.

De acordo com estimativas fornecidas pelo CTCV e Assimagra, prevê-se um crescimento contínuo de extração de rochas destinadas à indústria transfor-

madora, permitindo inferir que a procura de energia útil para todo o setor da pedra natural (extração e transformação) acompanhará uma tendência de crescimento semelhante à dessa evolução (tal como observado na Tabela 5.5 - de salientar que as taxas apresentadas correspondem sempre ao crescimento anual médio de cada quinquénio, sendo o aumento registado em cada intervalo temporal relativo ao quinquénio imediatamente anterior) [3].

Taxa de crescimento anual	25 - 30	30 -35	35-40	40 -45	45 - 50
	0,8%	0,9%	1,1%	1,2%	1,2%

► Tabela 5.5. Projeção de evolução da energia útil para setor da pedra natural, entre 2023 e 2050 [3].

### 5.4.2.2. Custos associados ao uso de vetores (OPEX)

Para refletir a competitividade económica de cada vetor, incorporaram-se no modelo os preços de mercado dos combustíveis e as suas projeções futuras. Estes valores permitem avaliar a evolução dos custos energéticos do setor e apoiar decisões sobre a escolha de fontes mais eficientes e sustentáveis.

A definição dos custos associados aos diferentes vetores energéticos – eletricidade, gasóleo, HVO e biodiesel – teve por base a consulta de diversos autores [5]–[9], complementada por uma projeção e análise comparativa das informações recolhidas. Os resultados obtidos, que servirão de base para a análise de sensibilidade e a calibragem do modelo OSeMOSYS (ver secção 5.3), encontram-se sintetizados na Tabela 5.6.

Custo [euro/PJ]	2023	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Eletricidade	33,33	46,06	42,70	39,60	36,771	34,04	31,56
Gasóleo	42,00	43,33	46,67	50,00	53,33	56,67	60,00
Biodiesel	-	-	46,05	49,90	47,38	41,35	37,00
HVO	39,70	39,70	43,55	47,40	43,38	39,35	34,00

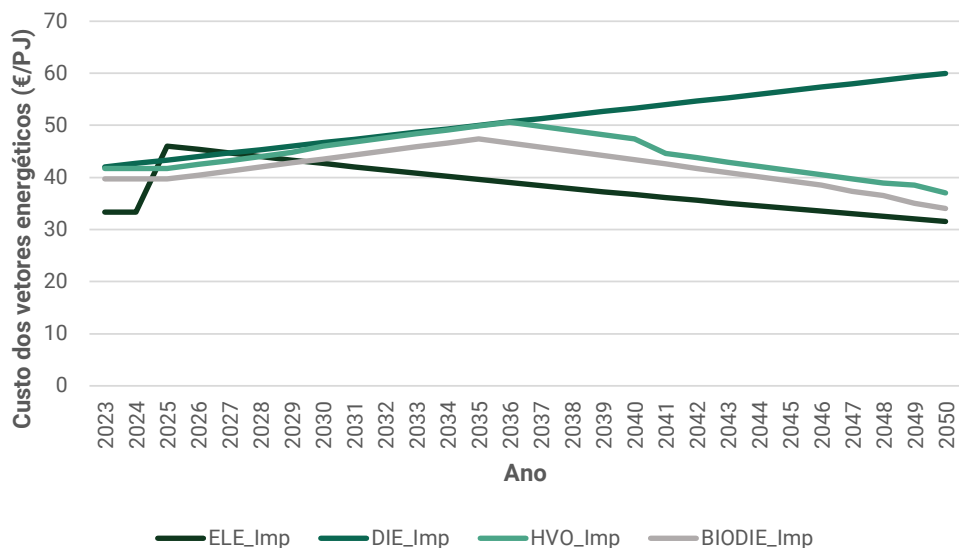
► Tabela 5.6. Estimativa de evolução de preços dos diferentes combustíveis, entre 2023 e 2050.

A análise da evolução dos preços dos combustíveis permite compreender a competitividade económica de cada vetor ao longo do horizonte de modelação, observando-se que:

- a eletricidade regista um aumento inicial do custo entre 2023 e 2025 (+38%), seguido de uma trajetória decrescente e contínua até 2050, resultando numa variação total de aproximadamente -5,3% no período 2023-2050. Esta queda reflete uma fase inicial de investimento em infraestruturas e tecnologias renováveis, seguida por uma redução dos custos de produção associada à maior penetração de energias limpas e aos ganhos de eficiência tecnológica;
- o gasóleo apresenta um crescimento linear e contínuo ao longo de todo o período analisado, passando de 42,00 €/PJ em 2023 para 60,00 €/PJ em 2050, o que representa um aumento de cerca de +42,9%. Esta evolução traduz o encarecimento progressivo dos combustíveis fósseis, impulsionado por fatores como a aplicação de taxas de carbono, a diminuição da oferta e a crescente pressão regulatória para a redução das emissões;
- o HVO evidencia uma tendência de custos mais elevados nos primeiros anos de adoção, com valores a subir de 46,05 €/PJ em 2030 para 49,90 €/PJ em 2035. A partir de 2035, observa-se uma redução até 2050 de cerca -25,8% face a 2035. Esta evolução reflete a maturação do mercado, com a expansão da capacidade produtiva, a otimização das cadeias de abastecimento e a consequente redução dos custos unitários de produção;
- o biodiesel apresenta um comportamento semelhante ao do HVO. O custo mantém-se estável entre 2023 e 2025 e aumenta até 2035 cerca de +19,4%, seguido de uma queda acentuada até 2050 de -28,3% face a 2035. No total, o biodiesel regista uma redução de cerca de -14,4% entre 2023 e 2050, refletindo o efeito combinado da melhoria tecnológica e do aumento da escala de produção.

A Figura 5.11 apresenta graficamente a evolução dos custos dos diferentes vetores energéticos entre 2023 e 2050, permitindo visualizar claramente as tendências de preços e a competitividade relativa de cada fonte.





► Figura 5.11. Projeção de evolução dos preços dos diferentes vetores energéticos entre 2023 e 2050.

No que respeita aos fatores de emissão de GEE, a Tabela 5.7 apresenta os valores adotados para cada vetor energético, assumindo-se que permanecem constantes ao longo de todo o período considerado, exceto no caso da eletricidade, que sofre uma progressiva descarbonização ao longo dos anos.

Fator de emissão	[MtCO <sub>2eq</sub> /PJ]
Gasóleo	0,074
HVO	0,015
Biodiesel	0,025

► Tabela 5.7. Fator de emissão dos vetores energéticos [10].

No caso da eletricidade, a redução gradual do fator de emissão segue as metas definidas no PNEC 2030 e no RNC 2050, refletindo a transição para uma rede elétrica mais limpa. A evolução projetada do fator de emissão da eletricidade entre 2023 e 2050 encontra-se na Tabela 5.8.

Fator de emissão	2023	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Eletricidade [MtCO <sub>2eq</sub> /PJ]	0,036	0,034	0,026	0,020	0,015	0,009	0,003

► Tabela 5.8. Projeção da evolução do fator de emissão de GEE da eletricidade entre 2023 e 2050 [1].

### 5.4.2.3. Licenças de carbono aplicadas aos combustíveis fósseis

A partir de 2027, entrará em vigor o novo Regime ETS 2 (segundo regime do Comércio Europeu de Licenças de Emissão – CELE), que abrangerá setores como transportes rodoviários, aquecimento de edifícios e pequenas empresas. O CELE é o principal sistema da União Europeia para reduzir as emissões de gases com efeito de estufa, através da atribuição de “licenças de carbono” que dão às empresas o direito de emitir uma determinada quantidade de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>). Se emitirem menos, podem vender as licenças excedentes; se emitirem mais, precisam de comprar licenças adicionais. Nesse âmbito, considerou-se relevante incluir, no modelo energético, os impactos associados à aplicação desta medida.

Embora a responsabilidade direta recaia sobre os fornecedores de combustíveis, os custos serão inevitavelmente repercutidos nos preços pagos pelos consumidores finais. Para refletir esta realidade, o modelo incorpora as licenças de carbono previstas, seguindo a lógica do Imposto Especial de Consumo de Gás Natural (IECGN). O IECGN é um imposto

nacional aplicado ao consumo de gás natural em Portugal, que inclui uma componente de carbono, calculada com base no preço do CO<sub>2</sub> no mercado europeu de emissões (CELE). À medida que o preço do carbono aumenta, o valor do IECGN também tende a subir.

As indústrias estão sujeitas ao IECGN, mas podem beneficiar de reduções ou isenções. Nomeadamente, as instalações já abrangidas pelo CELE, podem ficar isentas da componente de carbono do IECGN, uma vez que já internalizam os custos das emissões através da compra de licenças, evitando assim dupla tributação.

Deste modo, tanto através do IECGN como do futuro ETS 2, os custos associados às emissões de CO<sub>2</sub> deverão continuar a aumentar nos próximos anos, refletindo o esforço europeu de descarbonização da economia.

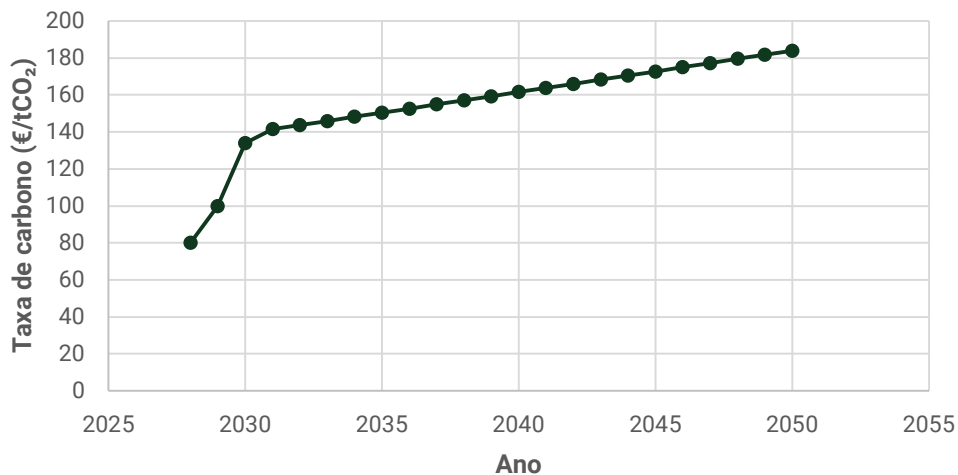
A Tabela 5.9 apresenta as taxas de carbono projetadas para o período 2030–2050.

Custo de emissões	2023	2035	2040	2045	2050
[euro/tCO <sub>2</sub> ]	134	150	162	172	184

► Tabela 5.9. Projeção da evolução das taxas de carbono entre 2030 e 2050 [11].

Espera-se que, ao longo do período em análise, os custos de emissão aumentem de 134 €/tCO<sub>2</sub> em 2030 para 184 €/tCO<sub>2</sub> em 2050, representando um crescimento de 37% [10].

A Figura 5.12 apresenta a evolução esperada das licenças de carbono entre 2027 e 2050, permitindo visualizar a tendência crescente e o impacto esperado sobre o setor da pedra natural.



► Figura 5.12. Evolução estimada dos custos das taxas de carbono entre 2027 e 2050 [10].

### 5.4.3. Modelo energético para o setor da pedra natural

Com o objetivo de identificar as trajetórias de descarbonização do setor da pedra natural até 2050, a modelação concentrou-se nos vetores energéticos utilizados nos diferentes processos produtivos, considerando um horizonte temporal até esse ano. No caso deste setor, a desagregação do consumo de energia pelos processos de extração e transformação revelou-se um desafio, devido à escassez de dados específicos. Por esse motivo, foi necessário recorrer a simplificações e aproximações baseadas nas informações disponíveis, resultando num modelo energético que agrega estes dois processos. De forma semelhante, verificaram-se dificuldades na obtenção de dados detalhados sobre as tecnologias, nomeadamente no que respeita aos custos de investimento e de manutenção, bem como às eficiências associadas. Acresce ainda a falta de caracterização das tecnologias emergentes que, no futuro, poderão contribuir para a descarbonização do setor.

Assim, o modelo energético desenvolvido foca-se sobretudo nos vetores energéticos atualmente disponíveis no mercado, bem como na introdução progressiva de alternativas futuras que possam assegurar o cumprimento das metas de descarbonização estabelecidas, sendo assim um modelo de otimização apenas dos custos operacionais.

Adicionalmente, em alguns dos cenários modelados, as tecnologias identificadas registam uma melhoria de eficiência até 10%. Esta evolução procura refletir ganhos associados à modernização da gestão operacional, à automação crescente dos processos e à incorporação de boas práticas industriais.

Importa salientar que, no âmbito da otimização, apenas são contemplados os custos associados ao sistema energético das unidades industriais. A

componente relativa ao fornecimento dos diversos vetores energéticos - incluindo a sua transformação e distribuição - é introduzida no modelo como dado de entrada, caracterizada pela sua disponibilidade, emissões associadas e preço. Assim, o modelo não realiza a otimização da produção de eletricidade, hidrogénio, ou outros vetores energéticos a nível nacional. A única exceção corresponde às unidades de geração de eletricidade para autoconsumo (por exemplo, sistemas fotovoltaicos), cuja operação é integrada na otimização do sistema industrial.

Para o setor da pedra natural, foram definidos três cenários principais de análise:

- *Business-As-Usual (BAU)*: representa uma evolução inercial, em que o setor continua a utilizar as tecnologias existentes e os mesmos vetores energéticos consumidos atualmente. Contudo, apesar de a procura de energia útil continuar a

aumenta ao longo do tempo, a rede elétrica continua o seu processo de descarbonização;

- *Conservador*: assume que o setor tem uma maior flexibilidade em termos de utilização de vetores energéticos pela não aplicação das taxas de carbono associadas aos combustíveis consumidos, incrementado, assim, o custo associado;
- *Acelerado*: considera-se que o setor terá de adotar vetores energéticos e tecnologias mais sustentáveis para que as metas de descarbonização sejam cumpridas.

Na tabela seguinte é apresentado um resumo dos cenários considerados.

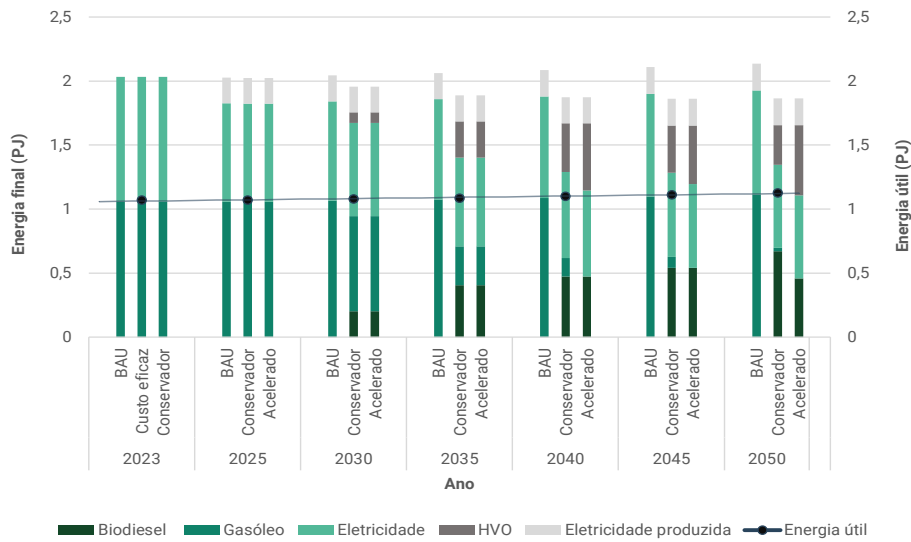
Cenário	Limite de emissões	Medidas eficiência energética	Taxas de carbono nos combustíveis usados	Descrição
BAU	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	"Business as usual" – sem novas políticas
Conservador	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Sem políticas de taxas de carbono
Acelerado	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	Políticas de mitigação com taxa de carbono + limite de emissões

► Tabela 5.10. Cenários considerados para o setor da pedra natural.

#### 5.4.4. Resultados da modelação energética para o setor da pedra natural

Na Figura 5.13 apresenta-se a evolução do consumo de energia final, por vetor energético, no setor da pedra natural (extração e transformação) entre 2023 e 2050 para os diferentes cenários modela-

dos, além disso, incluiu-se também a evolução estimada para o consumo de energia útil total (comum para todos os cenários).



► Figura 5.13. Evolução da energia final e útil de 2023 a 2050 para os cenários em análise.

Como se pode observar pela análise da Figura 5.13, prevê-se que a energia útil, correspondente à fração da energia final que é efetivamente convertida em trabalho útil, ou seja, a energia que realmente contribui para a realização do trabalho (por exemplo a geração de movimento ou energia mecânica), tenha uma tendência de crescimento de cerca de 5% entre 2023 e 2050, refletindo o aumento da capacidade produtiva e da intensidade das operações do setor. Por outro lado, estima-se que a energia final, correspondente à quantidade de energia fornecida ao setor após todas as etapas de transformação, transporte e distribuição, ou seja, a energia que chega efetiva-

mente às instalações sob a forma de eletricidade e combustíveis e que está disponível para ser consumida pelos equipamentos e processos produtivos, irá ter uma evolução diferente conforme o tipo de cenário apresentado:

- para o cenário BAU espera-se um crescimento de 5% no consumo de energia final entre 2023 e 2050;
- Nos cenários Conservador e Acelerado, cuja evolução em termos de consumo total é semelhante, prevê-se uma redução de 8% na utilização

de energia final de 2023 a 2050. Essa diminuição resulta da substituição de equipamentos convencionais por tecnologias mais eficientes e da melhoria contínua dos processos produtivos. Além disso, a crescente automatização e robotização dos processos industriais contribui para uma operação mais precisa, controlada e otimizada, reduzindo o desperdício energético e aumentando a produtividade por unidade de energia consumida. Assim, apesar de o setor produzir mais energia útil, consegue fazê-lo com menor consumo de energia final, traduzindo-se numa melhoria da eficiência energética global.

Para cada um dos quinquênios em análise observa-se o seguinte:

- O período de 2023 a 2025 caracteriza-se por um consumo energético fortemente dominado pelo gásóleo e pela eletricidade, refletindo a inércia tecnológica e a ausência de transformações estruturais significativas no curto prazo;
- No período de 2025 a 2030, o cenário Acelerado evidencia alterações relevantes no *mix* energético. A redução do consumo de gásóleo torna-se mais acentuada, enquanto o biodiesel ganha progressiva relevância, beneficiando da sua maior maturidade tecnológica e de uma cadeia de valor mais consolidada face ao HVO, que começa a emergir como alternativa, embora ainda com um contributo pouco expressivo. Em contrapartida, no cenário Conservador, a redução do gásóleo é menos pronunciada, mantendo-se este como vetor energético central nos primeiros anos. No caso do BAU, a ausência de políticas de descarbonização mantém o setor fortemente dependente de combustíveis fósseis, sem alterações significativas no perfil de consumo;
- Entre 2030 e 2040, as diferenças entre os três cenários tornam-se mais evidentes. No BAU, a ausência de medidas de eficiência energética e de tecnologias mais sustentáveis conduz a um aumento do consumo final de energia em relação aos outros cenários e é fruto da manutenção de uma matriz energética praticamente inalterada e sem inovação. No cenário Conservador, o gásóleo continua a ter um peso relevante no *mix* energético, ainda que com um ligeiro crescimento dos biocombustíveis. Já o cenário Acelerado apresenta uma diversificação energética mais expressiva, marcada pelo aumento do contributo do biodiesel e do HVO, refletindo uma trajetória de descarbonização mais consistente;
- Durante o período de 2040 a 2045, a transição energética é ainda mais evidente no cenário Acelerado. O gásóleo praticamente desaparece, sendo substituído por biodiesel e HVO, que passam a representar parcelas significativas do consumo total. A eletricidade mantém um peso estável, contribuindo para o equilíbrio e a resiliência do *mix* energético. No cenário Conservador, embora se verifique algum crescimento dos biocombustíveis, o gásóleo ainda não é totalmente eliminado, perpetuando uma dependência residual de fontes fósseis;
- Finalmente, entre 2045 e 2050, o cenário BAU continua a registar um aumento do consumo final de energia, de modo a satisfazer as necessidades do setor, mantendo uma reduzida penetração de combustíveis renováveis. No cenário Conservador, persiste algum consumo de gásóleo, embora em níveis mais reduzidos, enquanto o HVO ganha espaço, sem, contudo, assumir um papel dominante. Já no cenário Acelerado, o gásóleo é totalmente eliminado, e o setor passa a depender essencialmente

de biodiesel e HVO, consolidando um modelo energético de baixo carbono;

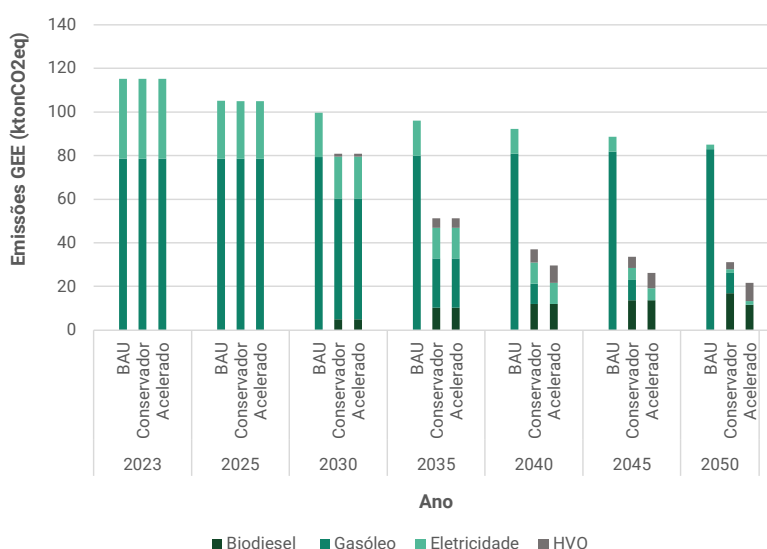
- Em todos os cenários, a expansão da geração fotovoltaica é limitada por restrições físicas e econômicas, nomeadamente o potencial máximo disponível para autoconsumo, condicionado pela área útil e pelo retorno do investimento. Verifica-se, contudo, uma tendência de redução gradual do consumo final de energia no setor, resultan-

te da adoção de equipamentos mais eficientes e da implementação de processos automatizados que permitem aumentar a capacidade produtiva com menor intensidade energética.

Na tabela seguinte apresenta-se uma síntese comparativa entre os diferentes cenários, evidenciando a evolução dos vetores energéticos e o grau de alinhamento de cada um com os objetivos de descarbonização.

	BAU	Conservador	Acelerado
Gasóleo	Mantém-se dominante	Reduz lentamente	Desaparece até 2050
Biodiesel	Nulo	Moderado	Relevante a partir de 2030
HVO	Nulo	Crescimento lento	Aumenta exponencialmente após 2035
Eletricidade	Estável	Moderado	Moderado
Alinhamento com metas climáticas	Não cumpre	Não cumpre	Cumpre totalmente

► Tabela 5.11. Síntese comparativa entre os diferentes cenários relativa a evolução dos vetores energéticos.



► Figura 5.14. Evolução das emissões de GEE associadas ao setor da pedra natural entre 2023 e 2050 para os cenários em análise.

Na Figura 5.14 é apresentada a evolução das emissões de gases com efeito de estufa para os cenários considerados e compatível com o consumo de energia apresentado na Figura 5.13.

No cenário BAU, a ausência de políticas públicas eficazes de mitigação das emissões de GEE conduz ao aumento do consumo energético e à consequente intensificação da dependência de combustíveis fósseis, resultando em níveis de emissões superiores ao longo do tempo, em comparação com os restantes cenários. Ainda assim, observa-se uma redução de 26% das emissões neste cenário de 2023 a 2050, associada à implementação de sistemas fotovoltaicos para autoconsumo e ao processo de descarbonização progressiva do sistema electroprodutor nacional.

Para os dois cenários em que são aplicadas restrições às emissões, o Conservador e o Acelerado, entre 2023 e 2050, verifica-se uma redução muito significativa das emissões de GEE no setor. No cenário Conservador, estima-se uma redução aproximada de 73% das emissões face a 2023 e de 86% das emissões face 2005. Enquanto no cenário Acelerado a descida é mais acentuada e ocorre de forma mais rápida essencialmente devido à substituição mais acelerada do gasóleo por HVO, podendo reduzir cerca de 81% das emissões face a 2023 e 91% face a 2005.

Os principais fatores que explicam esta trajetória de descarbonização, para ambos os cenários, ainda que com impactos diferentes em cada um deles, são os seguintes:

1. **Eliminação progressiva do gasóleo**, que em 2023 representa a maior fatia das emissões, mas vai sendo substituído por combustíveis alternativos de menor intensidade carbónica, como o biodiesel e o HVO. Estes vetores energéticos permitem descarbonizar o setor sem comprometer as necessidades energéticas.
2. **Contributo da eletricidade**, cujas emissões associadas diminuem ao longo do tempo devido à descarbonização crescente do sistema elétrico nacional, em linha com o PNEC 2030 e a RNC2050, bem como pela maior aposta em sistemas descentralizados de produção renovável (como o fotovoltaico para autoconsumo).
3. **Eficiência de equipamentos e processos**: ao longo dos anos, prevê-se que as empresas invistam em equipamentos mais eficientes e em metodologias de operação otimizadas, permitindo aumentar a eficiência global do setor, tanto em termos energéticos como produtivos. Este progresso traduz-se em menores consumos específicos e maior produtividade.

Em conjunto, estas alterações no *mix* energético e na origem da eletricidade permitem alcançar, no cenário Acelerado, uma trajetória consistente com as metas de neutralidade carbónica a longo prazo.

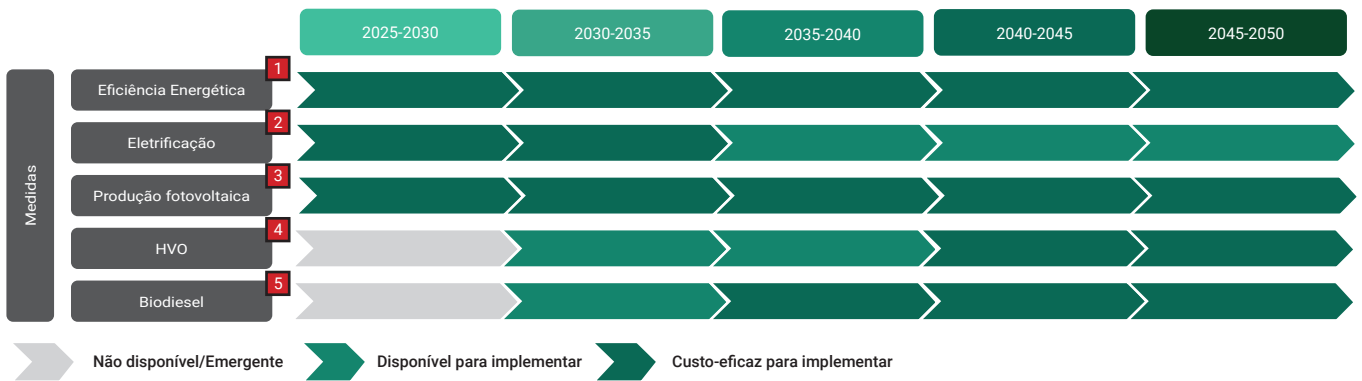
### 5.4.4.1. Cenário acelerado

Entre os cenários analisados, o cenário Acelerado corresponde à trajetória de descarbonização que minimiza os custos operacionais (OPEX) associados ao consumo dos diferentes vetores energéticos utilizados no setor da pedra natural. Dado que o modelo considera apenas os custos de operação e não integra custos de investimento (CAPEX) em novas tecnologias, este cenário resulta da otimização da combinação de vetores – eletricidade, gásóleo, biodiesel e HVO – que permite satisfazer as necessidades energéticas do setor ao menor custo operacional possível, garantindo simultaneamente o cumprimento das metas de redução de emissões estabelecidas. Assim sendo, o cenário Acelerado representa a solução economicamente mais eficiente no horizonte até 2050.

Em seguida é analisada detalhadamente a sua evolução tecnológica e o seu desempenho económico.

#### a) Evolução tecnológica

A evolução tecnológica prevista para o setor da pedra natural reflete uma trajetória de transição gradual rumo à descarbonização e à maior eficiência energética dos processos produtivos. O horizonte temporal entre 2025 e 2050 evidencia diferentes fases de maturação e adoção de tecnologias-chave, nomeadamente: eficiência energética, eletrificação, produção fotovoltaica, utilização de HVO e biodiesel. A Figura 5.15 apresenta o detalhe para todas as fases e tecnologias consideradas.



► Figura 5.15. Evolução tecnológica para o cenário Acelerado.

### a.1) Eficiência energética

A melhoria da eficiência energética surge como uma das primeiras medidas a ser implementada, beneficiando de soluções tecnológicas já disponíveis e com elevado grau de maturidade. Prevê-se que a modernização de equipamentos e a otimização de processos produtivos conduzam a um aumento gradual da eficiência, estimado em cerca de 10% entre 2023 e 2050. Esta evolução acompanhará os ciclos naturais de substituição de equipamentos e atualização tecnológica, promovendo uma redução direta no consumo energético e nas emissões associadas.

### a.2) Eletrificação dos processos

A eletrificação representa uma das principais alavancas para a descarbonização do setor. A substituição de tecnologias dependentes de combustíveis fósseis, como o gásóleo, por soluções elétricas ou híbridas (por exemplo, em sistemas de perfuração e geração de ar comprimido), deverá ocorrer de forma progressiva. O ritmo de adoção será mais intenso nos primeiros quinquênios (2025-2035), reduzindo-se posteriormente com a entrada de outras soluções complementares. Esta medida terá impacto mais significativo no subsetor da Extração, onde ainda existe maior dependência de equipamentos movidos a combustíveis fósseis.

### a.3) Produção fotovoltaica

A produção de eletricidade a partir de energia fotovoltaica (PV) apresenta elevado potencial de aplicação no setor, dada a crescente eletrificação dos processos e a maturidade tecnológica já alcançada. Trata-se de uma solução custo-eficaz e fiável, cuja implementação deverá ser promovida sempre que possível, contribuindo para a redução da dependência energética externa e para a sustentabilidade das operações.

### a.4) HVO

O HVO é uma alternativa promissora ao gásóleo convencional, embora a sua adoção enfrente, num primeiro momento (2025–2030), barreiras técnicas e económicas. Entre 2030 e 2040, espera-se o início da sua implementação, em resposta à necessidade de reduzir as emissões de gases com efeito de estufa (GEE). Na década seguinte (2040–2050), a maior maturidade tecnológica e o desenvolvimento do mercado deverão permitir uma penetração mais alargada desta solução nos processos produtivos do setor.

### a.5) Biodiesel

O biodiesel deverá apresentar uma penetração mais rápida que o HVO, beneficiando de uma cadeia de valor mais consolidada e de uma tecnologia madura. Apesar de requerer adaptações nos equipamentos existentes, constitui uma opção relevante para os processos de difícil eletrificação, podendo contribuir significativamente para a redução das emissões no curto e médio prazo.

## b) Evolução de custos

A evolução de custos prevista para o setor da pedra natural entre 2025 e 2050 será fortemente influenciada pela adoção gradual de tecnologias mais eficientes e sustentáveis, exigindo um equilíbrio entre o investimento inicial e os benefícios económicos obtidos a médio e longo prazo. Durante este período, as empresas deverão concentrar os seus esforços na modernização dos processos produtivos e na integração de soluções energéticas que contribuam para a redução dos custos operacionais e das emissões associadas.

Considerando as **medidas de longo prazo entre 2025 e 2050**, a produção fotovoltaica manter-se-

-á como uma das opções mais custo-eficazes ao longo de todo o horizonte temporal. Trata-se de uma tecnologia madura, com custos de instalação progressivamente mais baixos e reduzidas necessidades de manutenção, permitindo retornos económicos estáveis e previsíveis. A implementação de sistemas fotovoltaicos continuará, assim, a representar uma oportunidade sólida de investimento, assegurando uma diminuição significativa da fatura energética e uma maior independência face às flutuações do mercado de eletricidade. Paralelamente, a eletrificação dos equipamentos e a adaptação para versões híbridas representarão um dos principais vetores de investimento do setor. Alguns equipamentos atualmente em operação poderão ser convertidos para soluções híbridas, possibilitando uma transição faseada e economicamente equilibrada. No entanto, é expectável que surjam novas tecnologias, atualmente com menor maturidade e custos de investimento (CAPEX) mais elevados, mas que, a longo prazo, poderão substituir equipamentos de difícil eletrificação. A viabilidade económica dessas soluções dependerá de vários fatores como o ritmo de maturação tecnológica, da evolução dos custos energéticos e da evolução da regulamentação. As medidas de eficiência energética, por sua vez, deverão ser implementadas de forma contínua ao longo de todo o período em análise. Os investimentos serão realizados à medida que novas tecnologias mais eficientes se tornem disponíveis e acompanhando o ciclo de vida dos equipamentos. Estas melhorias permitirão uma redução progressiva do consumo energético e dos custos de operação, traduzindo-se em ganhos diretos de competitividade e sustentabilidade financeira para as empresas do setor.

Entre 2025 e 2030, prevê-se um aumento dos custos operacionais na ordem dos 5% face a 2023. Este crescimento será impulsionado pela implementação de novas políticas públicas e regula-

mentações ambientais, tanto a nível nacional como europeu, com destaque para o ETS 2 (“CELE 2”), que alargará o mercado de carbono a setores como o dos transportes e da energia. O conseqüente encarecimento do gásóleo e de outros combustíveis fósseis deverá refletir-se diretamente nos custos de operação das empresas do setor da pedra natural, especialmente na fase de extração, onde a dependência de maquinaria movida a gásóleo ainda é significativa. Neste contexto, a adoção de tecnologias fotovoltaicas deverá ganhar maior expressão, impulsionada pela sua relação custo-eficaz favorável e pela disponibilidade de incentivos públicos ao investimento em energias renováveis. A produção descentralizada de eletricidade a partir de fontes solares permitirá reduzir a exposição das empresas à volatilidade dos preços energéticos e mitigar parcialmente o impacto económico das novas medidas regulatórias.

Entre 2030 e 2035, o mercado energético do setor da pedra natural deverá assistir à introdução do HVO. A entrada deste novo vetor energético irá aumentar a diversificação da oferta de combustíveis renováveis, promovendo uma redução gradual dos custos operacionais associados ao consumo energético. A concorrência entre HVO e biodiesel tenderá a criar um equilíbrio de preços mais competitivo, favorecendo a adoção de soluções menos dependentes de combustíveis fósseis.

No período 2035–2040, o HVO deverá consolidar-se como uma opção particularmente atrativa, dada a sua maior compatibilidade com os equipamentos atualmente a gásóleo, o que permitirá uma redução do investimento inicial necessário à substituição ou adaptação das máquinas. Ainda assim, prevê-se que o biodiesel mantenha uma vantagem económica, resultante da maior maturidade da sua cadeia de valor e da maior disponibilidade no mercado, tornando-o uma opção de menor custo para deter-

minadas aplicações, sobretudo nas operações de extração e transporte.

Já entre **2040 e 2045**, tanto o biodiesel como o HVO deverão atingir plena disponibilidade comercial e paridade económica com os combustíveis fósseis, passando a ser opções custo-eficazes do ponto de vista operacional. Este período marcará a consolidação das tecnologias alternativas no setor, com as empresas a beneficiarem de um mercado mais estável, diversificado e competitivo.

Finalmente, no horizonte de **2050**, estima-se uma redução potencial até 26% dos custos operacionais

face a 2023, resultado direto da melhoria contínua da eficiência energética, da ampla adoção de fontes renováveis e da implementação de mecanismos de financiamento público direcionados para os vetores energéticos mais sustentáveis. Este cenário traduz o amadurecimento económico e tecnológico do setor, refletindo uma transição bem-sucedida para um modelo produtivo mais eficiente, resiliente e alinhado com as metas de neutralidade carbónica europeias.

#### 5.4.5. Conclusões

Os resultados da modelação energética para etapas de extração e de transformação da pedra natural permitem concluir que o setor da pedra natural apresenta um potencial significativo de redução das emissões de GEE até 2050.

O cenário de descarbonização Acelerado, demonstra que é possível alcançar uma redução de 91% das emissões de GEE face a 2005, mantendo a competitividade industrial e assegurando a fiabilidade operacional dos processos.

A análise identifica três vetores determinantes para a redução de emissões no setor da pedra natural:

- Eliminação gradual do gasóleo e a integração de combustíveis alternativos, como HVO e o

biodiesel, que têm uma menor intensidade carbónica e que são capazes de satisfazer as exigências operacionais do setor;

- O papel crescente da eletricidade de origem renovável, beneficiando tanto da descarbonização do sistema eletroprodutor nacional, como do reforço da instalação de fotovoltaico para autoconsumo;
- Ganhos de eficiência resultantes da otimização dos processos produtivos, que permitem reduzir consumos específicos e aumentar a produtividade.

## Referências

- [1]. APA, Roteiro para a Neutralidade Carbónica 2050 (RNC2050): Estratégia de Longo Prazo para a Neutralidade Carbónica da Economia Portuguesa em 2050, PT Ambiente, 2019.
- [2]. APA, Plano Nacional de Energia e Clima (PNEC), 2024. [Online]. Disponível em: <https://apambiente.pt/clima/plano-nacional-de-energia-e-clima-pnec>
- [3]. CTCV, Dados do Setor da Pedra Natural, 2025.
- [4]. Optimus, OSeMOSYS. [Online]. Disponível em: <http://www.osemosys.org/>
- [5]. IMARC, Biodiesel Price Trend, Index and Forecast.
- [6]. Prema Energy, "How Much Does HVO Fuel Cost Compared to Fossil Diesel". [Online]. Disponível em: <https://premaenergy.co.uk/how-much-does-hvo-fuel-cost-compared-to-fossil-diesel/>
- [7]. E. Bellini, "IRENA Predicts LCOE of Solar Will Drop to \$0.01–0.05 by Mid Century," PV Magazine.
- [8]. Campos, "Tarifas de Eletricidade e Preço Médio de uma Fatura da Luz," Selectra, 2025. [Online]. Disponível: <https://selectra.pt/energia/precos/eletricidade>
- [9]. R. Søggaard and L. Aau, Heat Roadmap Europe – EU28 Fuel Prices for 2015, 2030 and 2050, 2017.
- [10]. G. Vourliotakis and O. P. (EXERGIA S.A.), Greenhouse Gas Intensities of Transport Fuels in the EU in 2020, EXERGIA S.A., 2022.
- [11]. Carbon Credit Markets, "Fitch Ratings: Iniciativas da UE e Preço do Carbono US\$200/t até 2050," 2025. [Online]. Disponível em: <https://www.carboncreditmarkets.com/single-post/fitch-ratings-iniciativas-da-ue-e-pre%C3%A7o-do-carbono-us-200-t-at%C3%A9-2050>





## 06.

Trajecória para a Neutralidade Carbónica na Extração de Areias: Percurso de Redução de Emissões, Regeneração Ambiental e Serviços de Ecossistemas



## 6. Trajetória para a Neutralidade Carbónica na Extração de Areias: Percurso de Redução de Emissões, Regeneração Ambiental e Serviços de Ecossistemas

Diogo Caupers; Maria da Luz Alvim

Casa da Mesquita

### Introdução

O setor das areias em Portugal encontra-se numa fase crítica de transição, orientada pela urgência da descarbonização e pelas exigências crescentes de sustentabilidade, definidas em quadros regulatórios nacionais e europeus. Como recurso estrutural da construção, a areia assume responsabilidade acrescida no contexto das metas globais de neutralidade carbónica, exigindo um compromisso com um percurso rigoroso, científico e transparente, em articulação com critérios ambientais, sociais e de governança.

A atividade extrativa das areias possui especificidades relevantes – como a predominância de processos sedimentares, extração aquática/semi-aquática e elevado peso logístico do processamento (granulometria, lavagem) – que moldam de forma única a sua pegada de carbono. Estas características, enquanto desafios, abrem igualmente oportunidades para adotar soluções inovadoras pautadas por uma trajetória de mitigação contínua das emissões e valorização dos serviços de ecossistemas gerados pela regeneração sustentável das áreas esgotadas.

Portugal e a União Europeia definiram metas ambiciosas e vinculativas para a redução das emissões de carbono até 2030 e para alcançar a neutralidade carbónica até 2050, consagradas em instrumentos como o PNEC 2030. Neste enquadramento, o se-

tor das areias compromete-se com uma trajetória de transição, centrada na redução progressiva de emissões diretas e indiretas, inovação operacional e integração de práticas transparentes.

Esta trajetória inovadora conjuga práticas extrativas responsáveis e a regeneração ecológica de áreas esgotadas, privilegiando a criação de zonas florestais e a promoção ativa dos serviços de ecossistemas (como biodiversidade, proteção do solo e valorização hídrica). As ações adotadas vão além da mera compensação, estabelecendo um percurso fundamentado em evidência científica, quantificação robusta, auditoria independente e reporte transparente dos benefícios ambientais, sociais e económicos, alinhando-se com o princípio “*Do No Significant Harm*” (DNSH) e as exigências dos mercados/reguladores. Este enfoque acrescido na regeneração ambiental contribui para a credibilidade do setor, evita riscos de *greenwashing* e gera valor ecológico e social para toda a cadeia produtiva.

As emissões indiretas (âmbito 3), e em particular o transporte, podem representar uma componente substancial da pegada do setor. A trajetória para a neutralidade carbónica exige estratégias de mitigação abrangentes, que incluam roteirização eficiente, incentivo a meios de transporte de menor intensidade carbónica, e reporte exaustivo e audita-

vel dos fluxos logísticos. Essas ações devem estar alinhadas com a visão de economia circular e contribuir para a valorização ambiental dos territórios através da sua regeneração e serviços de ecossistemas.

## 6.1. Caracterização do Setor das Areias e Desafios de Descarbonização

### 6.1.1. Especificidades da extração de areias

O setor das areias em Portugal apresenta uma diversidade operacional que reflete não só os diferentes depósitos disponíveis, mas também a necessidade de adaptação a critérios ambientais, sociais e de governança. A trajetória para a neutralidade carbónica do setor deve considerar esta diversidade, reconhecendo a redução progressiva da extração em leitos de rio por motivos ambientais e valorizando práticas de extração terrestre sustentáveis, alinhadas com a regeneração ecológica e a constituição de serviços de ecossistemas nas áreas exploradas.

A extração aquática em albufeiras e zonas costeiras controladas têm impacto relevante na pegada carbónica do setor, principalmente devido à utilização de dragas e sistemas de bombagem de grande potência alimentados por combustíveis fósseis. No contexto da trajetória para a neutralidade carbónica, recomenda-se a quantificação precisa destas emissões de âmbito 1 e a procura contínua de soluções tecnológicas e operacionais para redução direta do

consumo energético, favorecendo a adoção de práticas certificáveis e de transição justa, enquanto se executa a regeneração e valorização ecológica das áreas exploradas.

O processamento compreende múltiplas etapas de consumo intensivo de energia (lavagem, crivagem, separação e eventual secagem artificial), com impacto significativo nas emissões indiretas (âmbito 2). É fundamental que a trajetória para a neutralidade carbónica preveja monitorização contínua destes consumos energéticos, otimização da eficiência e integração crescente de energia renovável, assegurando simultaneamente a gestão responsável da água e o reporte transparente segundo as melhores práticas internacionais.

### 6.1.2. Pegada carbónica específica do setor

O perfil de emissões do setor das areias exige abordagens de quantificação robustas, envolvendo inventário detalhado das emissões diretas (âmbito 1) – provenientes dos consumos de combustíveis em equipamentos e veículos – ajustado ao método de extração. A trajetória para a neutralidade carbónica pressupõe a redução prioritária destas emissões na fonte, sendo crucial documentar e auditar os ganhos e as eficiências alcançadas em cada segmento operacional.

As emissões de âmbito 2, relativas ao consumo de eletricidade (processamento, lavagem, separação), devem ser quantificadas tanto pelo método *location-based* como *market-based*, refletindo a influência do *mix* energético nacional e as melhorias operacionais. A trajetória para a neutralidade carbónica implica o aproveitamento progressivo do aumento das renováveis na matriz elétrica e a incorporação de sistemas de autoconsumo, reportando e auditando sistematicamente os impactos de cada solução.

### 6.1.3. Pressões regulamentares e de mercado

O quadro regulatório europeu e nacional impõe maior rigor na quantificação, reporte e transparência da pegada de carbono dos materiais de construção. Para responder a estas exigências e garantir credibilidade, os produtores deverão recorrer a Declarações Ambientais de Produto (DAP) baseadas em Análise do Ciclo de Vida (ACV) segundo normas reconhecidas, incorporando não só as emissões, mas também os benefícios gerados pelos serviços de ecossistemas e a recuperação das áreas esgotadas.

Em Portugal, estratégias como o PNGR (Plano Nacional de Gestão de Resíduos) e a ENA (Estratégia Nacional para os Agregados) destacam a importância da regeneração das áreas exploradas e da minimização do impacto ambiental. No âmbito da trajetória para a neutralidade carbónica, estas orientações são potenciadas através da implementação de planos robustos de regeneração ecológica, cria-

ção de zonas florestais e avaliação dos serviços de ecossistemas, reportando resultados de modo transparente e alinhado com as exigências internacionais.

O rápido crescimento do mercado da construção sustentável – apoiado por incentivos, certificações ambientais e maiores exigências dos utilizadores – reforça a necessidade dos produtores de areias integrarem plenamente uma trajetória para a neutralidade carbónica. Para além da redução das emissões, destaca-se a valorização associada à regeneração das áreas esgotadas, à constituição de áreas de floresta certificada e à promoção dos serviços de ecossistemas. Tal abordagem confere diferenciação, valor socioambiental e alinhamento com as expectativas de mercado e de regulação, materializando o percurso de credibilização continuada do setor.



## 6.2. Trajetória para a Neutralidade Carbónica das Areias: Implementação Progressiva

### 6.2.1. Quantificação precisa das emissões na extração de areias

O sucesso da trajetória para a neutralidade carbónica das areias depende de um sistema robusto, auditável e cientificamente referenciado de quantificação das emissões, que contemple as especificidades operacionais dos areiros. Esta abordagem, permite correlação precisa entre volumes extraídos/processados e emissões. A compensação via sequestro florestal, integrando adicionalidade e prestação de serviços de ecossistemas, complementa o processo.

A trajetória para a neutralidade carbónica deve começar por um inventário completo das emissões, distinguindo fontes por tipo de tecnologia, uso energético e âmbito. Para extração aquática, é essencial monitorizar as emissões das dragas, sistemas de bombagem, variabilidades sazonais e características dos depósitos. Nas operações terrestres, o inventário engloba escavadoras, carregadoras e toda a logística interna. O processo deve ser transparente, auditado periodicamente e alinhado com as metodologias mais atuais do setor.

O processamento de areias, em particular operações de lavagem e separação, gera emissões relevantes que devem ser quantificadas principalmente com base em medições reais dos consumos energéticos. A trajetória recomenda a definição e uso de fatores de emissão ajustados ao tipo de processo e qualidade da areia, garantindo rastreabilidade e validação científica dos dados, e proporcionando transparência para reporte.

O transporte interno e a logística interna são fontes essenciais de emissões (âmbito 1), cuja correta quantificação exige o registo minucioso de trajetos, cargas e consumos energéticos. A introdução de telemetria avançada e sistemas de monitorização digital é recomendada para aumentar a precisão dos inventários, identificar hotspots de emissões e apoiar planos de otimização contínua.

### 6.2.2. Integração do sequestro florestal e serviços de ecossistemas na trajetória para a neutralidade carbónica

A integração de projetos de sequestro florestal certificados deve enquadrar-se como etapa complementar, apenas após mitigação direta, na trajetória para a neutralidade carbónica. Estas soluções devem ser ajustadas às condições locais dos areiros, garantir adicionalidade, permanência e integrar o reporte de benefícios ambientais gerados, incluindo serviços de ecossistemas.

A reconversão de areiros esgotados em zonas florestais certificadas corresponde a uma das principais estratégias de regeneração ambiental. Esta abordagem valoriza as características dos solos pós-extração (drenagem e baixa compactação) promovendo a adaptação ecológica para maximizar o sequestro de carbono e, sobretudo, potenciar os serviços de ecossistemas: restauração de biodiversidade, melhoria dos solos, valorização paisa-

gística e resiliência territorial. A escolha criteriosa de espécies deve obedecer a critérios técnicos e de conservação.

A criação de zonas húmidas e espaços ecológicos multifuncionais potencia não só o sequestro de carbono em biomassa e solos, mas também múltiplos serviços de ecossistemas reconhecidos (depuração das águas, habitats para espécies protegidas, regulação hídrica), valorizando a contribuição positiva do setor.

A adoção de sistemas agroflorestais junto a areiros reforça o impacto da trajetória para a neutralidade carbónica, integrando diferentes usos do solo (agricultura, silvicultura sustentável) e promovendo cobenefícios económicos e ambientais. Estes sistemas devem ser certificados, quantificados e

reportados por indicadores transparentes, contribuindo para a economia circular, rendimento local, e integrando métricas sobre serviços de ecossistemas.

A parceria com proprietários florestais para compensação deve ser considerada se garantir adicionalidade efetiva (incremento ao sequestro pré-existente), permanência e verificação independente recorrente. Estes contratos e sistemas de monitorização devem respeitar os referenciais reconhecidos, e ser integrados no reporte global do ciclo de vida, assegurando rastreabilidade, transparência e credibilidade na trajetória do setor.

### 6.2.3. Certificação e rastreabilidade específica para a trajetória da neutralidade carbónica nas areias

O desenvolvimento de sistemas de certificação para a trajetória da neutralidade carbónica das areias deve considerar as especificidades técnicas do setor e garantir monitorização contínua das emissões, regeneração ecológica, gestão de água e valorização dos serviços de ecossistemas. Esta certificação deve ser multidimensional (carbónica, ambiental, social), regida por padrões reconhecidos, auditável por entidade independente, e incorporando critérios de adicionalidade, rastreabilidade e DNSH.

A rastreabilidade detalhada é requisito essencial para a credibilidade da trajetória de descarbonização: cada lote/fornecimento deve ser ligado a um registo auditável das respetivas emissões (por

âmbito) e ao balanço de carbono da operação, incluindo créditos por serviços de ecossistemas regenerados. O sistema deve assegurar rastreabilidade desde a origem até ao utilizador final, prevenindo alegações infundadas de neutralidade e permitindo verificação transparente pelo mercado e reguladores.

A digitalização da rastreabilidade, recorrendo a códigos únicos e plataformas digitais interoperáveis, viabiliza a transparência de toda a cadeia de valor. Para cada lote, deve ser disponibilizado ao cliente, auditor e regulador: a origem, método de extração, consumo e tipo de energia, métodos de regeneração, serviços de ecossistemas atribuídos e evidências do cumprimento do percurso de neutralidade.

A certificação da trajetória para a neutralidade carbónica das areias deve ser conduzida por entidades independentes acreditadas, de acordo com normas internacionais, combinada com auditorias externas

periódicas e publicação transparente de relatórios. Só assim se assegura confiança, credibilidade e alinhamento duradouro com as exigências dos mercados, reguladores e expectativas da sociedade.



## 6.3. Benefícios Específicos da Trajetória para a Neutralidade Carbónica no Setor das Areias

### 6.3.1. Diferenciação no mercado de materiais de construção

A adoção de uma trajetória para a neutralidade carbónica confere ao setor das areias uma oportunidade de diferenciação sustentada, indo além da simples competição por preço. O aumento da procura por materiais verificados e critérios internacionais (LEED, BREEAM, VERDE) favorece produtos com pegada carbónica comprovadamente baixa e integrados em práticas de recuperação ambiental e serviços de ecossistemas, permitindo acesso a clientes e mercados premium sensíveis à sustentabilidade.

A diferenciação com base numa trajetória para a neutralidade carbónica é estratégica, considerando o contributo crítico das areias na produção de betão—um dos principais emissores do setor da construção. Ao adotar percurso robusto, auditável, os produtores de areias facilitam a concretização de metas ambientais dos restantes elos, promovendo integração de toda a cadeia de valor em torno de soluções comprovadas de sustentabilidade e regeneração.

Esta trajetória posiciona o setor para aceder a mercados de maior valor, incluindo obras públicas, edifícios com certificação ambiental e projetos financiados por fundos verdes. Estes mercados exigem, além da performance ambiental, transparência, rastreabilidade e reporte, bem como prestação de contas pela regeneração de áreas esgotadas e pela geração de serviços de ecossistemas auditáveis.

A valorização do percurso ambiental das areias é ampliada através da colaboração com especificadores, consultores de sustentabilidade e projetistas. Ferramentas de cálculo de emissões e a divulgação dos impactos positivos de serviços de ecossistemas podem promover a adoção desta abordagem inovadora, favorecendo a integração de critérios ambientais em projetos desde a fase de conceção.

### 6.3.2. Valorização económica do sequestro florestal e serviços de ecossistemas

A integração do sequestro florestal certificado na trajetória para a neutralidade carbónica gera fontes diversificadas de valorização económica, do ponto de vista dos mercados, financiadores e reputação. A comercialização de créditos de carbono só é robusta quando baseada em adicionalidade, permanência e relatórios reconhecidos por padrões internacionais, permitindo receitas crescentes en-

quanto se mantém a integridade ambiental e regulatória.

O valor das zonas regeneradas transcende a comercialização de créditos: envolve produção de biomassa, produtos florestais não lenhosos como a resina e, em particular, serviços de ecossistemas — como regulação hídrica, conservação da biodiversi-

dade, proteção dos solos e recreio —, diversificando os fluxos de receitas, aumentando a resiliência.

A regeneração ecológica e a recuperação paisagística promovem ainda a criação de valor social e económico adicional, viabilizando atividades de turismo de natureza, recreio, educação ambiental e desenvolvimento comunitário. Estas práticas reforçam a aceitação social da trajetória para a neutralidade carbónica, mitigam conflitos e valorizam a credibilidade do setor perante as partes interessadas.

### 6.3.3. Redução de riscos regulamentares e operacionais

A antecipação e alinhamento com os critérios de reporte e transparência da trajetória para a neutralidade carbónica permitem ao setor das areias mitigar riscos regulamentares, posicionar-se de forma competitiva, adaptar-se pro-ativamente à evolução normativa europeia e evitar custos de adaptação súbitos e penalizações reputacionais associadas ao *greenwashing*.

A integração sistemática da regeneração ecológica e dos serviços de ecossistemas credibiliza o setor promovendo aceitação dos planos de recuperação, do licenciamento ambiental, e dos processos de renovação de licenças, para além de fortalecer o relacionamento com reguladores, diferenciando positivamente o setor face ao cumprimento meramente formal de requisitos.

O percurso de diversificação associado à trajetória para a neutralidade carbónica reduz a exposição a volatilidades setoriais, ao integrar atividades flores-

A sustentabilidade demonstrada da trajetória para a neutralidade carbónica abre portas a instrumentos de financiamento verde e apoios públicos (europeus e nacionais), nomeadamente fundos de transição energética, economia circular e recuperação ecológica previstos nos programas de resiliência nacionais e europeus, reduzindo o custo de capital para projetos do setor e aumentando a atratividade dos investimentos.

tais, serviços recreativos, créditos de carbono e serviços ambientais. Assim, aumenta-se a resiliência económica das empresas, potenciando fontes de receitas regulares e previsíveis, sustentadas num modelo de negócio circular e regenerativo.

A valorização da aceitação e reputação públicas é potencializada por uma comunicação contínua, transparente e baseada em métricas auditáveis — demonstrando benefícios da regeneração de áreas esgotadas e dos serviços de ecossistemas. O reporte periódico, transforma a perceção pública e reduz riscos de oposição local, promovendo o setor como agente efetivo do desenvolvimento sustentável credível e robusto.

## 6.4. Desafios Específicos e Estratégias de Mitigação na Trajetória para a Neutralidade Carbónica

### 6.4.1. Complexidade da quantificação em operações aquáticas

A quantificação rigorosa das emissões em operações de extração aquática constitui um desafio permanente devido à variabilidade operacional, climatérica e às limitações de monitorização direta. Dragas e sistemas de bombagem operam sob condições dinâmicas que afetam o consumo energético e, por consequência, as emissões. Nesta trajetória, é essencial privilegiar metodologias de monitorização adaptativa e calibragem contínua dos inventários para garantir transparência e credibilidade na contabilização.

Para enfrentar estes desafios, recomenda-se a adoção de sistemas avançados de monitorização em tempo real (IoT, telemetria inteligente), assegurando registo contínuo dos principais parâmetros operacionais. Estas soluções tecnológicas proporcionam dados robustos para auditoria externa, alimentando relatórios de sustentabilidade e possibilitando o ajuste de estratégias de mitigação em tempo útil.

O desenvolvimento de modelos preditivos com base em inteligência artificial e *machine learning* pode otimizar a estimativa das emissões em função de variáveis monitorizadas, reduzindo a dependência de medições diretas e promovendo maior precisão. Estes modelos devem ser calibrados com dados de campo e validados cientificamente de modo recorrente, de acordo com as melhores práticas de reporte, para garantir rastreabilidade e aceitação por verificadores independentes.

A parceria com fabricantes possibilita o desenho e integração de sistemas de controle de emissões mais fiáveis e eficientes, promovendo inovações na eficiência energética dos equipamentos. Estas colaborações devem ser orientadas para a adoção de standards reconhecidos, fomentando a melhoria contínua, redução do impacto carbónico e integração de componentes ambientais e de serviços de ecossistemas no ciclo de vida dos equipamentos e operações.

### 6.4.2. Gestão da variabilidade sazonal

A trajetória para a neutralidade carbónica nas areias deve considerar a variabilidade sazonal intrínseca tanto nas operações extrativas como nos processos de regeneração florestal. A produção e as emissões podem oscilar devido a fatores meteorológicos e restrições ecológicas, tornando necessária uma abordagem flexível e integrada de planeamento e monitorização de ciclos produtivos e de sequestro.

O sequestro florestal, sobretudo em trajetórias certificadas, também manifesta padrões sazonais, levando a possíveis desfasamentos temporais entre emissões (extração) e absorção (florestas). Assim, recomenda-se a integração de mecanismos de balanceamento temporal e contabilização diferenciada para garantir rastreabilidade e estabilidade nas avaliações de ciclo de vida.

Sistemas de contabilização anuais ou plurianuais, devem ser estabelecidos para ajustar balanços entre emissões e sequestro, incluindo reservas de créditos para compensar flutuações. A gestão flexível e reportada desta variabilidade contribui para decisões transparentes e permite maior credibilidade junto de reguladores, auditorias e mercados de carbono.

Recomenda-se a diversificação geográfica das áreas de regeneração para compensação, integrando diferentes contextos climáticos, fenológicos e edáficos. Esta estratégia reduz a vulnerabilidade sazonal e climática, potencializa serviços de ecossistemas (regulação hídrica, biodiversidade, resiliência do solo) e estabiliza as projeções/resultados de sequestro no percurso para a neutralidade carbónica.

#### 6.4.3. Aceitação do mercado e comunicação de valor

A aceitação do mercado na trajetória para a neutralidade carbónica resulta da comunicação clara e baseada em dados do valor ambiental e económico do percurso adotado. Este processo deve evidenciar não só a redução da pegada de carbono, mas também a geração de serviços de ecossistemas obtidos pela regeneração das áreas esgotadas. O setor deve ensinar continuamente a cadeia de valor sobre os benefícios tangíveis do percurso e sobre os diferenciais éticos, técnicos e ambientais face a produtos convencionais.

As estratégias de comunicação devem ser segmentadas e adaptadas: para produtores de betão, destacar a integração em metas de sustentabilidade e reporte para certificações (ex. LEED, BREEAM, GRI); para arquitetos e consultores, enfatizar a transparência do ciclo de vida, a rastreabilidade, a credibilidade da trajetória e os serviços de ecossistemas associados à regeneração das áreas exploradas, fatores que suportam diferenciação e credibilidade do produto final junto do consumidor e regulador.

O desenvolvimento de calculadoras e métricas transparentes e integradas em ferramentas de cálculo certificadas, permite aos decisores quantificar os benefícios ambientais do uso de areias sustentáveis na trajetória para a neutralidade carbónica. Estas ferramentas devem incluir não só inventários carbónicos, mas também indicadores de serviços de ecossistemas, facilitando o acesso a relatórios de sustentabilidade e financiamentos verdes.

Projetos demonstrativos com monitorização detalhada e publicação de dados auditáveis, idealmente acompanhados pela academia, podem robustecer a aceitação setorial do percurso, fornecendo casos de estudo validados e reportáveis para a comunidade, investidores e reguladores. Estes estudos devem evidenciar os resultados ambientais, económicos e a geração de serviços de ecossistemas decorrentes da trajetória para a neutralidade carbónica, sustentando a adoção alargada e a confiança dos diferentes *stakeholders*.

## 6.5. Implementação Prática da Trajetória para a Neutralidade Carbónica no Setor das Areias

### 6.5.1. Desenvolvimento de parcerias estratégicas na trajetória para a neutralidade carbónica

A trajetória para a neutralidade carbónica nas areias exige a construção de parcerias estratégicas robustas por toda a cadeia de valor, assegurando rigor e transparência científicos. São fundamentais acordos de colaboração com instituições de investigação para desenvolver metodologias credíveis de quantificação de emissões e de sequestro associados à regeneração de áreas esgotadas, integrando serviços de ecossistemas e promovendo reporte robusto e auditável.

Parcerias com a Academia e Associações do Setor Florestal são essenciais para aportar *know-how* em gestão florestal sustentável, quantificação integrada, análise de ciclo de vida e acesso a oportunidades de financiamento nacionais/europeias para a investigação aplicada na descarbonização e valorização ambiental do setor.

A articulação proativa com entidades reguladoras como a APA, ICNF e DGEG é crucial para garantir o reconhecimento institucional da trajetória para a neutralidade carbónica, facilitando processos de licenciamento. O envolvimento destas entidades no desenvolvimento e validação metodológica reforça a credibilidade do percurso e antecipa exigências regulatórias futuras.

Parcerias com empresas da cadeia de valor a jusante (produtores de betão, construtoras, consultores de sustentabilidade) são estratégicas para assegurar aceitação pelo mercado, adoção comum de critérios de reporte e viabilidade comercial do percurso. Iniciativas em conjunto podem envolver acordos de fornecimento sustentável, desenvolvimento de produtos inovadores, e comunicação transparente dos co-benefícios ecológicos, sociais e económicos, apoiados por serviços de ecossistemas regenerados.

### 6.5.2. Faseamento da implementação na trajetória para a neutralidade carbónica

A adoção da trajetória para a neutralidade carbónica deverá respeitar um plano faseado, permitindo validação científica, adaptação a contextos reais e melhoria contínua. A fase 1 deve concentrar-se em projetos-piloto que abracem a diversidade do setor (métodos de extração, escalas, contextos geográficos), aliando redução direta de emissões à regeneração ecológica e valorização dos serviços de ecossistemas, fundamentais para reporte.

A escolha dos projetos-piloto deve contemplar: disponibilidade de informação operacional (produção, energia), potencial para regeneração/restauração de áreas esgotadas, proximidade a mercados verdes, viabilidade financeira e técnica, e capacidade de gerar co-benefícios ambientais auditáveis, testando a aplicabilidade da trajetória em contextos diferenciados e adaptando as estratégias sempre que necessário.

A fase seguinte amplia o percurso, absorvendo as lições da etapa piloto e sofisticando os sistemas de monitorização, certificação e reporte integrado. Simultaneamente, promove-se a expansão de parcerias e estratégias de comunicação direcionadas a mercados sensíveis à sustentabilidade, destacando os serviços de ecossistemas e os ganhos de valor acrescentado resultantes da regeneração ambiental.

O horizonte final é a adoção transversal da trajetória pelo setor, sustentada pelo desenvolvimento de standards técnicos partilhados, certificação harmonizada e incentivos claros a nível regulatório e de mercado. A experiência acumulada em Portugal serve ainda de base à internacionalização responsável do percurso, promovendo a exportação de conhecimento, práticas e valorização de serviços de ecossistemas gerados através da regeneração de áreas industriais.

### 6.5.3. Sistemas de monitorização e verificação científica e transparente

Sistemas robustos de monitorização e verificação, desenvolvidos segundo as normas internacionalmente reconhecidas, são fundamentais para assegurar a credibilidade e melhoria contínua da trajetória para a neutralidade carbónica. Estes sistemas devem garantir recolha precisa, rastreável e auditável de dados, tanto sobre as emissões das operações como sobre o sequestro e os serviços de ecossistemas proporcionados pelas áreas regeneradas.

A monitorização carbónica deverá combinar medições diretas (sensores, telemetria) com uso de fatores de emissão validados cientificamente, permitindo alavancar eficiência operacional, reduzir custos e alimentar processos de reporte automatizado e auditoria regular. Esta abordagem apoia a total transparência e a comparabilidade dos resultados, em linha com as expectativas de reguladores e financiadores.

O sequestro florestal e a avaliação dos serviços de ecossistemas resultantes da regeneração devem

ser monitorizados por inventários regulares, técnicas de deteção remota (satélite, LiDAR) e instalação de *plots* permanentes, assegurando fiabilidade, comparabilidade e relatórios validados por metodologias reconhecidas. A integração destes dados no sistema global de reporte reforça a rastreabilidade do percurso.

A credibilidade da trajetória para a neutralidade carbónica assenta na verificação independente, incluindo auditorias recorrentes a sistemas, dados e resultados. O reporte público e transparente dos processos e *evidence-based outcomes* reforça a confiança dos clientes, reguladores, financiadores e sociedade civil, consolidando a posição do setor perante exigências em evolução.

## Conclusão

A trajetória para a neutralidade carbónica constitui uma oportunidade transformadora para o setor das areias em Portugal, enquanto percurso robusto, incremental e auditável rumo à descarbonização. Mais do que apenas reduzir emissões, esta abordagem integra sistematicamente práticas de regeneração ambiental nas áreas esgotadas – valorizando serviços de ecossistemas (biodiversidade, regulação hídrica, captura de carbono, valorização social). Tal percurso reforça a credibilidade, cria valor ambiental, social, económico e posiciona o setor como referência em sustentabilidade alinhada com os requisitos europeus e expectativas de mercado.

O setor das areias apresenta especificidades técnicas, operacionais e económicas (diversidade de métodos, processos e produtos) que exigem uma trajetória de neutralidade carbónica flexível e adaptativa, sustentada por rigorosa quantificação de emissões e dos serviços de ecossistemas incorporados. A abordagem deve garantir robustez científica, flexibilidade operacional e reporte transparente, promovendo a melhoria contínua e a responsividade às exigências regulatórias e a diferentes contextos de exploração.

O sucesso da trajetória para a neutralidade carbónica depende de uma abordagem colaborativa e *multistakeholder*, envolvendo operadores do setor, associações, instituições de investigação, reguladores, entidades de certificação e utilizadores finais. O desenvolvimento de parcerias estratégicas, implementação de sistemas de certificação reconhecidos internacionalmente, mecanismos financeiros ajustados e reporte robusto são fundamentais para superar desafios técnicos e económicos e garantir credibilidade, rastreabilidade e aceitação junto do mercado e entidades reguladoras.

O contexto atual, marcado pelo aumento das exigências de transparência na pegada de carbono, maior disponibilidade de financiamento verde e procura intensificada por materiais sustentáveis, torna especialmente propícia a adoção da trajetória para a neutralidade carbónica no setor das areias. As organizações que investirem pro-ativamente neste percurso conquistarão uma vantagem competitiva sustentável e contribuirão de forma significativa para o cumprimento dos compromissos nacionais e europeus de descarbonização e regeneração ambiental.



## Referências

### 1. Política e Estratégia Nacional e Europeia

- Ministério do Ambiente e da Transição Energética, Plano Nacional
- Energia e Clima 2030 (PNEC 2030), Lisboa: MAATE, 2020. Disponível em: [https://apambiente.pt/sites/default/files/\\_Clima/Planeamento/20241030\\_pnec2030\\_maen.pdf](https://apambiente.pt/sites/default/files/_Clima/Planeamento/20241030_pnec2030_maen.pdf)
- Parlamento Europeu; Conselho da União Europeia, "Regulation (EU) 2021/1119 of the European Parliament and of the Council of 30 June 2021 establishing the framework for achieving climate neutrality (European Climate Law)," Official Journal of the European Union L 243, pp. 1–17, 09-Jul-2021. Disponível em: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX%3A32021R1119&from=EN>
- Direção-Geral de Energia e Geologia (DGEG), Estratégia Nacional para os Agregados 2030, Lisboa: DGEG, 2022. Disponível em: <https://www.dgeg.gov.pt/pt/areas-transversais/relacoes-institucionais-e-de-mercado/politica-energetica/estrategia-nacional-de-longo-prazo-para-o-combate-a-pobreza-energetica/>
- \*Agência Portuguesa do Ambiente (APA), PNGR 2030 – Plano Nacional de Gestão de Resíduos, Lisboa: APA, 2020.

### 2. Inventário e Quantificação das Emissões

- International Organization for Standardization (ISO), ISO 14064-1:2018 – Greenhouse gases – Part 1: Specification with guidance at the organization level for quantification and reporting of greenhouse gas emissions and removals, Geneva: ISO, 2018.
- World Resources Institute; World Business Council for Sustainable Development, The Greenhouse Gas Protocol: A Corporate Accounting and Reporting Standard, Revised Edition, Washington, DC: WRI/WBCSD, 2015. Disponível em: <https://ghgprotocol.org/sites/default/files/standards/ghg-protocol-revised.pdf>
- International Organization for Standardization (ISO), ISO 14040:2006 – Environmental management – Life cycle assessment – Principles and framework, Geneva: ISO, 2006.
- International Organization for Standardization (ISO), ISO

14044:2006 – Environmental management – Life cycle assessment – Requirements and guidelines, Geneva: ISO, 2006.

- International Organization for Standardization (ISO), ISO 14025:2006 – Environmental labels and declarations – Type III environmental declarations – Principles and procedures, Geneva: ISO, 2006.
- Instituto Português da Qualidade (IPQ), NP ISO 14025:2019 – Rótulos e declarações ambientais – Declarações ambientais tipo III – Princípios e procedimentos, Caparica: IPQ, 2019.
- European Aggregates Association (UEPG), Aggregates Industry Greenhouse Gas Emissions Inventory Guidance, Brussels: UEPG, 2019. Disponível em: <https://www.aggregates-europe.eu/publications/>
- Associação Portuguesa dos Industriais de Mármore, Granitos e Ramos Afins (ASSIMAGRA), Road to 2050: Roteiro para a Descarbonização do Setor da Pedra Natural, Lisboa: ASSIMAGRA, 2024. Disponível em: <https://assimagra.pt/projectos/road-to-2050>

### 3. Serviços de Ecossistemas e Regeneração Ambiental

- Millennium Ecosystem Assessment, Ecosystems and Human Well-being: Synthesis, Washington, DC: Island Press, 2005. Disponível em: <https://www.millenniumassessment.org/documents/document.356.aspx.pdf>
- Forest Stewardship Council (FSC), FSC-PRO-30-006 V1-2 – Ecosystem Services Procedure: Demonstrating the impact of forest stewardship on ecosystem services, Bonn: FSC International, 2020. Disponível em: <https://connect.fsc.org/document-centre/documents/resource/392>
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories: Volume 4 – Agriculture, Forestry and Other Land Use, Geneva: IPCC, 2006. Disponível em: <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/vol4.html>
- International Organization for Standardization (ISO), ISO 14067:2018 – Greenhouse gases – Carbon footprint of

products – Requirements and guidelines for quantification, Geneva: ISO, 2018.

- International Institute for Environment and Development (IIED), Mining for the Future: Appendix C – Abandoned Mines Working Paper, London: IIED, 2002. Disponível em: <https://www.iiied.org/sites/default/files/pdfs/migrate/G00560.pdf>
- Society for Ecological Restoration (SER), International Principles and Standards for the Ecological Restoration and Recovery of Mine Sites, Washington, DC: Society for Ecological Restoration, 2023. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/rec.13771>
- Agência Portuguesa do Ambiente (APA), Recuperação Ambiental de Áreas de Exploração de Recursos Minerais: Guia Prático, Lisboa: APA, 2019.

#### 4. Certificação, Transparência e Rastreabilidade

- International Organization for Standardization (ISO), ISO 14068:2023 – Greenhouse Gas Management and Related Activities – Carbon Neutrality. Geneva, Switzerland: ISO, 2023.
- British Standards Institution (BSI), PAS 2060:2014 – Specification for the Demonstration of Carbon Neutrality. London, UK: BSI, 2014.
- Forest Stewardship Council (FSC), Ecosystem Services Certification and Procedures. Bonn, Germany: FSC International, 2020. [Online]. Disponível em: <https://fsc.org/en/ecosystem-services-for-businesses>
- PEFC Portugal, Certificação de Gestão Florestal Sustentável. Lisboa, Portugal: PEFC Portugal.

#### 5. Regeneração, Carbono e Economia Circular Aplicada à Indústria

- International Union for Conservation of Nature (IUCN) and European Commission (DG ENV), Nature-Based Solutions and Land Restoration in the EU. Brussels, Belgium: European Commission, 2021. [Online]. Disponível em: <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/11f42940-61e1-11f0-bf4e-01aa75ed71a1/language-en>
- C. Antunes, “Apresentação,” Universidade do Algarve.

[Online]. Disponível em: <https://www.ccdr-alg.pt/site/sites/ccdr-alg.pt/files/eventos/ualgarve-carlaantunes.pdf>

- Agência Portuguesa do Ambiente (APA), Relatório Estado do Ambiente 2023 – Secção Solos e Território, Recuperação de Áreas Mineradas. Lisboa, Portugal: APA, 2023. [Online]. Disponível em: <https://rea.apambiente.pt>

#### 6. Mercado, Incentivos e Green Finance

- European Commission, EU Taxonomy for Sustainable Activities. Brussels, Belgium: European Commission, 2020. [Online]. Disponível em: [https://finance.ec.europa.eu/sustainable-finance/tools-and-standards/eu-taxonomy-sustainable-activities\\_en](https://finance.ec.europa.eu/sustainable-finance/tools-and-standards/eu-taxonomy-sustainable-activities_en)
- European Investment Bank (EIB), Green Loans and Green Finance: Guidance Paper. Luxembourg: EIB, 2023. [Online]. Disponível em: [https://www.eib.org/attachments/lucalli/20240145\\_eib\\_group\\_2023\\_climate\\_bank\\_roadmap\\_progress\\_report\\_en.pdf](https://www.eib.org/attachments/lucalli/20240145_eib_group_2023_climate_bank_roadmap_progress_report_en.pdf)
- Verra, Verified Carbon Standard (VCS) Program Documentation. Washington, DC: Verra. [Online]. Disponível em: <https://verra.org/project/vcs-program/>
- Gold Standard Foundation, Gold Standard for the Global Goals. Geneva, Switzerland: Gold Standard, 2023. [Online]. Disponível em: <https://www.goldstandard.org>
- U. S. Green Building Council (USGBC), LEED Reference Guide for Building Design and Construction. Washington, DC: USGBC, 2013. [Online]. Disponível em: <https://www.usgbc.org/leed>
- Building Research Establishment (BRE), BREEAM New Construction Technical Manual. Watford, UK: BRE Global, 2022. [Online]. Disponível em: <https://breeam.com/breeam-version-7/downloads>
- Direção-Geral de Energia e Geologia (DGEG), Relatórios de Monitorização Setorial dos Agregados. Lisboa, Portugal: DGEG. [Online]. Disponível em: <https://www.dgeg.gov.pt/>
- Agência Portuguesa do Ambiente (APA) and CTCV, Programas-piloto de regeneração ecológica em areiros e pedreiras. Lisboa, Portugal: APA/CTCV, 2022.





**07.**

Capacitar  
para a  
Descarbonização

## 7. Capacitar para a Descarbonização

Descarbonizar a Indústria é uma das prioridades europeias no processo de transição energética e descarbonização, apontando-se metas muito ambiciosas para o setor industrial.

Apesar da alta pressão para contribuir com reduções significativas de emissões de dióxido de carbono, a indústria, através da contínua eficiência energética, eco-inovação e evolução tecnológica para processos e produtos mais sustentáveis, continua a tentar dar passos firmes para reduzir significativamente as emissões de GEE, no difícil processo de transição climática.

Apesar de todo o esforço, a indústria requer uma transformação estrutural, para criar oportunidades no processo de transição climática e com isso conseguir um diferencial competitivo, na resposta a metas demasiado rígidas e ambiciosas para a realidade industrial e geopolítica europeia.

Para que tal aconteça, é imprescindível capacitar os quadros de conhecimento na adoção de práticas, tecnologias e estratégias que por um lado promovam uma economia de baixo carbono, mas por outro criem novas oportunidades.



## 7.1. Desafios vs Oportunidades

Apesar de todos os constrangimentos à descarbonização, como a dimensão política e regulamentar, tecnológica, de dinâmicas de eficiência coletiva, conhecimento e outras barreiras, há também muitas oportunidades.

A resistência à adoção de comportamentos e práticas no domínio da descarbonização é ainda muito visível na cultura das empresas, falta uma clara estratégia para a descarbonização por parte dos empresários e falta de conhecimento por parte dos colaboradores, o que limita o investimento e a adoção de tecnologias, bem como a consciencialização das oportunidades de descarbonização e do potencial de rentabilidade para os seus negócios (inovação tecnológica e incentivos financeiros).

Capacitar é fulcral para uma adoção eficaz e em larga escala de processos e tecnologias de baixo carbono e está intimamente associada à premente necessidade de desenvolvimento de novos perfis de competências.

São algumas as barreiras, que podem traduzir-se em oportunidades, por via da capacitação de empresários e ativos das empresas:

- **Escassez de mão-de-obra**

Atualmente a escassez de mão-de-obra, é um desafio, mas também uma oportunidade, porque incentiva os empresários a repensar os seus processos industriais e o investimento em novas tecnologias de fabrico e automatização de processos, para processos mais eficientes, mais limpos, com uma menor produção de desperdícios e consumo de recursos;

- **Transição Digital**

A transformação digital e automatização de processos, é um caminho para minimizar desperdícios e criar processos mais sustentáveis, mas é necessário dotar os colaboradores de competências digitais, análise de dados e ferramentas de automatização de processos. Da mesma forma, capacitar para a adoção de medidas e práticas sustentáveis e de descarbonização, é uma necessidade premente e com necessidade de upskilling em múltiplos perfis profissionais, especialmente em quadros técnicos;

- **Enquadramento Legal**

O quadro regulatório e as metas europeias, são ambiciosas e os mercados cada vez mais exigentes, pelo que dotar os empresários e quadros técnicos das empresas de conhecimento, é imprescindível no caminho da sustentabilidade e descarbonização, que mais do que uma necessidade, deve ser entendido como uma oportunidade de transformação estrutural e de reconfiguração da atividade industrial.

## 7.2. Caminhos para a Capacitação da Força Laboral

A transição para uma economia de baixo carbono, através da capacitação, necessita de estratégia e planejamento, apesar do elevado nível de incerteza, para aproveitar as oportunidades de reestruturação industrial:

- Mapear, através de uma projeção da força de trabalho futura, os processos industriais, identificando processos de modernização, assentes em processos de inovação, digitalização ou automação de tarefas, (avaliar a extinção ou substituição de tarefas e requalificação de mão-de obra);
- Mapear necessidades e rever a matriz de competências das indústrias do setor da pedra natural;
- Diagnosticar, mapear cenários, aplicar métodos com um maior foco na resolução de problemas do chão-de-fábrica e focar tecnologias digitais (introduzindo os conceitos de indústria 4.0) e de Economia Circular/Sustentabilidade;
- Rever a oferta formativa existente e propor novos percursos formativos;
- Repensar e reformar os modelos de formação, nomeadamente na criação de novos formatos de formação, assentes em modelos imersivos de treino, baseados em experiências piloto de aprendizagem, que integrem experiências imersivas, podendo ser uma peça-chave no processo de transição para o novo paradigma da tripla transição (Ambiental, Digital e Social);
- Aproveitar as oportunidades de financiamento para requalificar e fazer evoluir a força de trabalho da Indústria.

O *reskilling* ou *upskilling* da força laboral, proporciona uma maior apetência para as novas tecnologias e tecnologia de baixo carbono, o que apesar de funcionar como um vetor de suporte à descarbonização, se envolver empresas, governo, clusters e organizações setoriais, o impacto esperado, embora indireto e de médio e longo prazo, pode ser elevado.



### 7.3. Skills para a Adoção de Práticas de Baixo Carbono

Capacitar os profissionais do setor com *skills* para melhorar a eficiência energética, implementar sistemas de gestão e adotar soluções digitais e circulares rumo à neutralidade carbónica, passa por criar percursos formativos que incluam, entre outros, os seguintes vetores de descarbonização:

- **Eficiência Energética**  
Melhorar o desempenho energético, capacitando para a identificação de processos de melhoria da Eficiência Energética;
- **Eletrificação e Biocombustíveis**  
Explorar o potencial de Eletrificação e Integração de biocombustíveis;
- **Eco-inovação**  
Criar estratégias e práticas de Eco- inovação, no desenvolvimento de produtos e processos mais sustentáveis, menos exigentes em recursos, mantendo-os dentro de um circuito fechado;
- **Redução de Consumos**  
Reduzir Consumos Energéticos e Custos Operacionais;
- **Tecnologias de Captura de CO<sub>2</sub>**  
Explorar processos e metodologias de Captura de (emissões) CO<sub>2</sub>, resultantes dos processos industriais;
- **Tecnologias Digitais, Automatização e Sensorização**  
As tecnologias digitais e da Indústria 4.0 permitem fomentar práticas mais sustentáveis e monitorizar de forma preventiva e corretiva aos perfis de consumo de recursos das empresas. Consciencializar para o Impacto da Tecnologia (*Sensores, Robots, IoT, Big Data, Cloud Compu-*

*ting, IA, Machine learning, realidade aumentada e outros recursos inteligentes), para a recolha de dados, para a resposta rápida e eficiente e para a desmaterialização de processos.*

Adotar processos automatizados e robotizados, permite aumentar a eficiência de processos industriais e aumentar a rentabilidade;

- **Reaproveitamento, Economia Circular e Simbioses Industriais**

Consciencializar para o reaproveitamento, para a Economia Circular e Simbioses Industriais, analisando criteriosamente os subprodutos resultantes da atividade de extração ou beneficiação.

Na capacitação da força laboral, apesar de caber às empresas o papel principal, os clusters e associações setoriais assumem particular relevância, tendo em conta a natureza coletiva das mesmas, bem como o governo, no alinhamento de regulamentação e financiamento.





**08.**

## Considerações Finais



## 8. Considerações Finais

A descarbonização do setor da pedra natural passa por uma transformação profunda que implica repensar produtos e processos, tornando-os mais eficientes e sustentáveis. Este caminho exige flexibilidade tecnológica e produtiva, capaz de integrar energias renováveis, otimizar o uso de recursos, gerir resíduos de forma eficaz e melhorar a eficiência energética e hídrica, assegurando um futuro mais responsável e competitivo para o setor.

Os cenários de descarbonização definidos, permitem identificar as trajetórias mais relevantes para a redução de emissões no setor, assim como os vetores estratégicos cuja implementação se revela determinante para alcançar esses objetivos, nomeadamente a:

- Substituição do gasóleo por combustíveis de baixo carbono, como o biodiesel e o HVO. A adoção de biodiesel e HVO, com um fator de emissão significativamente inferior, permite a redução imediata das emissões sem necessidade de substituição dos equipamentos;
- Eletrificação com recurso a eletricidade renovável. A utilização de energia elétrica descarbonizada, através do sistema electroprodutor nacional ou pelo autoconsumo fotovoltaico, é uma das vias mais robustas para reduzir emissões;
- Eficiência energética e otimização dos processos. A modernização de equipamentos, a implementação de sistemas de monitorização ou a reorganização dos fluxos produtivos, permitem reduzir os consumos específicos, aumentar a produtividade e diminuir os custos operacionais.

A redução de emissões depende, igualmente, da adoção de tecnologias inovadoras que ainda estão em desenvolvimento. Para acelerar este caminho, os projetos-piloto assumem um papel decisivo, permitindo testar, validar e ampliar novas soluções. Só através da cooperação entre setores, empresas, centros tecnológicos e instituições de investigação será possível partilhar conhecimento, reduzir riscos e impulsionar a inovação que o futuro exige.

A modernização do setor da pedra natural traduz-se em ganhos de eficiência energética, melhor gestão da água e redução do impacto ambiental através de uma economia mais circular. Esta transformação depende também da capacitação de empresários e técnicos, que encontram aqui uma oportunidade para modernizar processos, reforçar a competitividade e responder às exigências de um mercado cada vez mais orientado para a sustentabilidade. O caminho da descarbonização não é único nem linear, exigindo soluções adaptadas a cada empresa e um esforço conjunto entre todos os atores da cadeia de valor. Esta colaboração tem permitido testar tecnologias, partilhar conhecimento e desenvolver respostas inovadoras aos desafios do setor. Mais do que cumprir metas climáticas, trata-se de impulsionar a inovação, qualificar profissionais e preparar o setor para um futuro competitivo, assente em regeneração, cooperação e responsabilidade ambiental, onde a sustentabilidade se afirma como condição essencial para a estabilidade e prosperidade das sociedades.





An aerial photograph of a quarry or construction site, showing various structures, roads, and a large body of water. A large, dark green diagonal overlay covers the left and bottom-left portions of the image.

**A.**

# Contribuições para um Setor Mais Sustentável

**ROAD TO 2050**  
ROTEIRO PARA A DESCARBONIZAÇÃO  
DO SETOR DA PEDRA NATURAL



# A. Contribuições para um Setor Mais Sustentável

## A.1. Otimização de Processos na Indústria Extrativa

Samuel Neves; Anabela Jorge

ARROW4D – Consultores de Engenharia e Geofísica, Lda

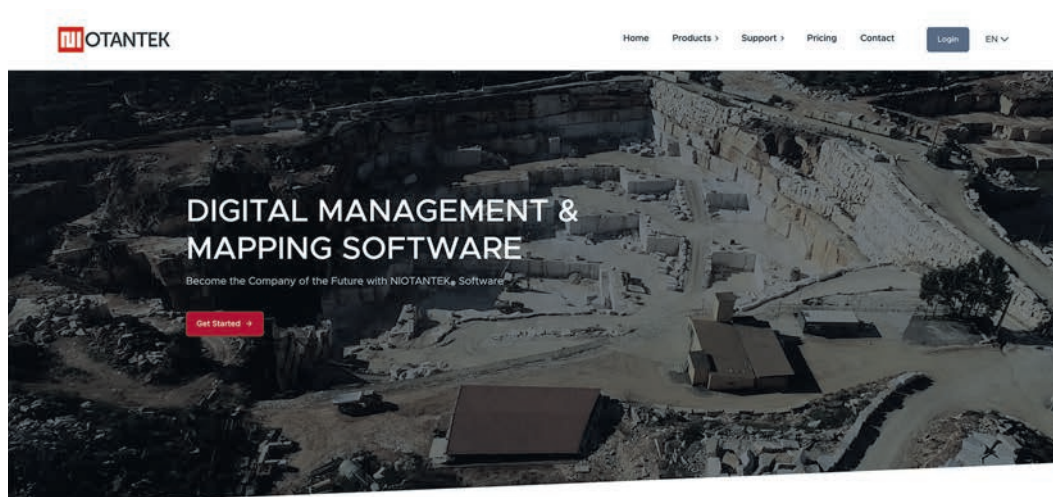
### Inovação e sustentabilidade

Palavras-chave: Pedra natural; mármore, granitos, IA, SIG, BIM, modelos digitais 3D, Plataforma, cloud, indústria 4.0.

### Quem somos?

A NIOTANTEK® é uma marca europeia da empresa ARROW4D – Consultores de Engenharia e Geofísica, Lda., sediada em Évora (Portugal, 2018) que se dedica ao desenvolvimento de software para a gestão inteligente de pedreiras e minas.

As soluções digitais avançadas que dispõe, nomeadamente os sistemas digitais NIOTANTEK®, ajudam as empresas do setor extrativo a otimizar operações, reduzir desperdícios e minimizar impactos ambientais, promovendo uma exploração mais sustentável, atrativa e segura dos recursos naturais.



- Figura A.1.1 A plataforma NIOTANTEK® é um sistema integrado de gestão digital para pedreiras, minas e outras indústrias que combina dados de vários sensores (satélite, drone, geotécnicos, geofísicos e outros).

## Sustentabilidade através da tecnologia

A era digital impulsionou inovações no setor extrativo com tecnologias disruptivas, representando um futuro sustentável e atrativo para o setor, tornando-o mais eficiente e responsável.

Transformar a indústria da extração numa indústria mais sustentável, passa indubitavelmente pela digitalização inteligente e automatização dos seus processos.

- Realidade Aumentada na Indústria extrativa

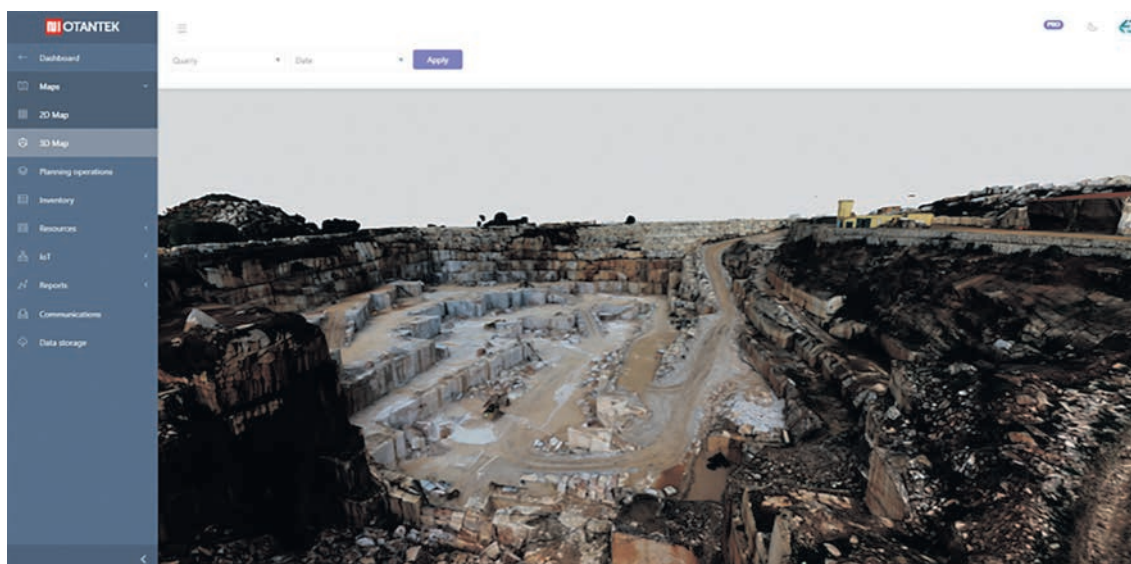
A Realidade Aumentada (RA) é um dos exemplos como a forma de trabalhar está a mudar em todos os setores, e o setor extrativo não é exceção. A RA pode ajudar os colaboradores sobre a forma de operar os equipamentos, fornecer formações de segurança em tempo real, executar soluções no terreno e até organizar visitas virtuais ao local.

Por exemplo, na África do Sul, a empresa *Simulated Training Solution* criou a primeira parede anti-explosão de realidade virtual, um dispositivo de formação que permitiu aos formandos praticar as suas competências. Este caso foi replicado em três outros locais do país, o que levou a uma formação profissional mais eficaz. A RA pode ainda ser utilizada no planeamento e segurança de pedreiras, bem como na manutenção preventiva ou corretiva de máquinas, permitindo aos técnicos visualizar os

Ao incorporar tecnologias digitais, a indústria extrativa pode otimizar a utilização de todos os recursos, minimizar o impacto ambiental, reforçar a segurança e aumentar a rentabilidade.

procedimentos adequados aos diferentes cenários. Através de dispositivos como óculos ou capacetes de realidade aumentada, os trabalhadores das pedreiras podem ver os procedimentos passo a passo em diversos elementos multimédia sobrepostos ao ambiente real, e proceder em conformidade.

A **NIOTANTEK®** tem vindo a desenvolver um conjunto de tecnologias, software e hardware, que permite a leitura da realidade 3D e converte em digital. Com base nesta tecnologia é possível registar todo o processo desenvolvido na realidade, analisar, e tomar medidas de otimização de processos, reduzindo tempos de operação, desgaste acelerado das máquinas devido a processos não otimizados, reduzindo custos de operação, e minimizando as emissões de CO<sub>2</sub>.



► Figura A.1.2 Mapas 2D, 3D e cálculos de volume são automaticamente disponibilizados na plataforma NIOTANTEK®.

## • Inteligência Artificial na Indústria Extrativa

A Inteligência artificial (IA) está a ter um impacto significativo na indústria, ajudando a tornar-se mais eficiente, competitiva e sustentável. Os algoritmos de IA podem analisar grandes quantidades de dados provenientes de vários sensores para prever com maior exatidão vários cenários. Tais como, previsibilidade do consumo energético das máquinas, prever procedimentos que sejam mais rápidos, económicos e sustentáveis, e prever a distribuição qualitativa 3D dos maciços rochosos, de acordo com os critérios do explorador, de modo a orientar os planos de lavra para operações mais focadas e reduzindo o custo e o impacto ambiental da exploração. Além disso, a IA pode ser utilizada para otimizar as operações, melhorando a eficiência e reduzindo os riscos de segurança. Por exemplo, alguns sistemas de IA podem prever quando o equi-

pamento precisa de manutenção, evitando avarias dispendiosas e paragens de produção.

Estes são apenas alguns exemplos de como a inteligência artificial está a transformar o setor extrativo. À medida que estas tecnologias continuam a avançar, iremos observar mais inovações que tornem a atividade extrativa mais segura, eficiente e sustentável.

A NIOTANTEK® implementou um conjunto de algoritmos de IA que permite a rastreabilidade e parametrização do bloco automática, desde a sua origem até à saída da pedreira.

- Inovação para um setor sustentável

Através da utilização da plataforma **NIOTANTEK**<sup>®</sup> de gestão integrada, é possível aumentar a eficiência, otimizar processos, rastrear produtos e subprodutos, monitorizar todos os processos em tempo real, de modo a reduzir custos, tempo, emissões de CO<sub>2</sub>, e aumentar a rentabilidade e reputação do seu negócio. Possibilita ainda a tomada de decisões baseadas em dados reais, que cobrem todas as etapas do processo, desde a origem da extração do bloco de pedra, transporte e armazenamento do produto ou subproduto. Todo este processo é monitorizado e registado no gestor de stock em tempo real, permitindo a fácil comunicação e partilha de informação técnica com outros agentes de negócio, ou fases do processo industrial até ao produto final.

A tecnologia baseada em inteligência artificial e análise de dados avançada, permite às empresas tomarem decisões mais detalhadas e reais, reduzindo custos e impactos ambientais.

- O futuro digital no setor extrativo

A **NIOTANTEK**<sup>®</sup> é uma marca de software de gestão integrada de pedreiras e minas altamente tecnológica, concebida fundamentalmente para as empresas de exploração de pedreiras, minas, aterros sanitários, ou construção civil.

- Rastreabilidade dos produtos e subprodutos;
- Comunicação fácil, iterativa e digital com outros agentes de negócio;
- Maior agilidade de processos industriais;
- Redução de custos com otimização de processos;
- Exploração otimizada com menor impacto ambiental;
- Maior segurança nas operações;
- Gestor de stock com parametrização BIM e geolocalização do bloco;
- Atratividade do setor extrativo;
- Monitorização em tempo real do estado das máquinas;
- Contribuição para monitorização das emissões de CO<sub>2</sub>.

Desde 2020 a **Arrow4D** iniciou-se uma aposta forte no desenvolvimento de uma plataforma multidisciplinar que permitisse aos exploradores de pedreiras e similares a gestão integrada com recursos a tecnologias inovadoras. Tais como, digitalização 3D, mapas 2D georreferenciados de alta resolução,

bases de dados, sensorização, digitalização de processos administrativos, gestão de ativos, digitalização das medidas de segurança e higiene no trabalho, baseados em algoritmos avançados com recurso a *deep learning*, IA, base de dados, cyber-segurança, etc.

A **Arrow4D** não se limitou a desenvolver novas tecnologias para os seus clientes, mas também a ter as mesmas preocupações ambientais e sustentáveis. Desenvolvendo soluções mais amigas do ambiente, fácil utilização e sustentáveis.

Em 2025 a **Arrow4D** lançou a **NIOTANTEK® MASTER** é uma solução tecnológica que combina várias tecnologias (**NIOTANTEK® MRP**, **GEOMAP** e **DRONE**), que permite a gestão integrada e monitorização da sua pedreira ou mina em qualquer momento e em qualquer lugar.

Esta solução contribui fortemente para a redução de emissões de CO<sub>2</sub>, é flexível e totalmente digital, e de rápida resposta (24/48h). Está capacitada com quadros técnicos especializados e serviços de TI em Portugal.

A **NIOTANTEK® MASTER** requer um **DRONE** para efetuar os mapeamentos das suas pedreiras em qualquer momento. Pode escolher o **DRONE** mais adequado para as suas necessidades, para isso temos uma equipa de técnicos especializados que pode ajudar neste processo.

Após a recolha de dados o utilizador deverá introduzir os dados na **NIOTANTEK® GEOMAP** que irá produzir os mapas 2D, modelos 3D e cálculo de volumes das suas pedreiras. Que posteriormente será enviada para a **NIOTANTEK® MRP** onde pode gerir toda a informação das operações da sua pedreira.

Nos seguintes parágrafos serão abordados mais detalhadamente a solução **NIOTANTEK® MASTER** que integra a **NIOTANTEK® MRP**, **GEOPMAP** e **DRONE**.

## UAV / DRONE

Para digitalizar de forma automática o seu terreno é necessário recorrer a sensores para recolher dados. O UAV/Drone permite utilizar diversos sensores que permitem captar informação do seu terreno. E posteriormente, utilizar essa informação

em softwares especializados, tais como o software **NIOTANTEK® GEOMAP**, onde poderá obter os resultados pretendidos. A utilização desta tecnologia é não invasiva, fácil utilização e de baixa emissão de CO<sub>2</sub>.



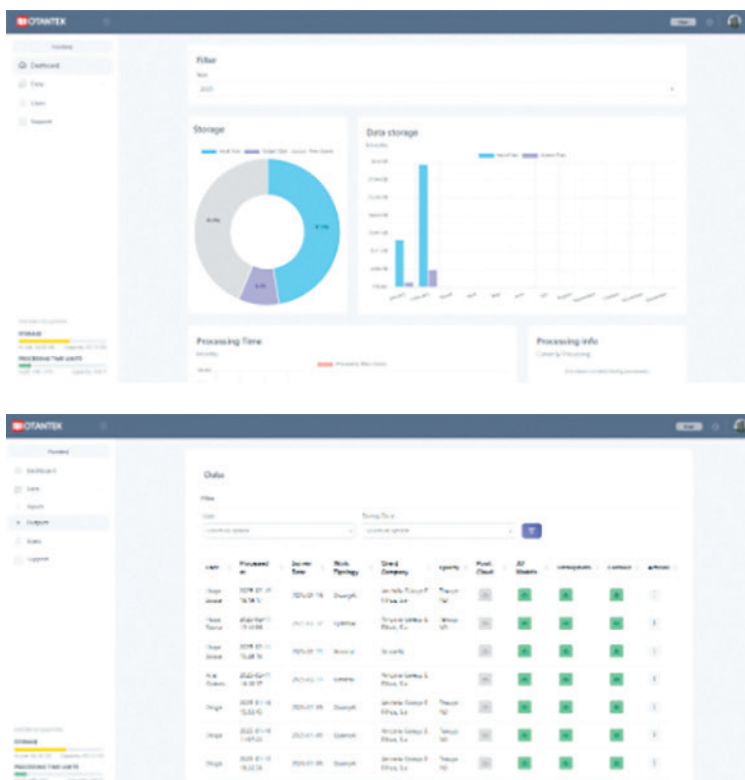
- Figura A.1.3 Os drones permitem capturar imagens aéreas de alta precisão, essenciais para gerar mapas 2D, modelos 3D, nuvens de pontos e cálculos geométricos com detalhe e velocidade, reduzindo custos e tempo operacional.

## NIOTANTEK® GEOMAP

A **NIOTANTEK® GEOMAP** funciona em ambiente CLOUD (Supercomputação) e o seu objetivo é o processamento fotogramétrico automático dos dados obtidos pelo Drone, em qualquer momento e em qualquer lugar.

A **NIOTANTEK® GEOMAP** tem dois módulos de processamento: **GENÉRICO** e **QuarryAI**. O processamento **GENÉRICO** está preparado para executar processamento fotogramétrico. O módulo **QuarryAI**

foi desenvolvido com base nos resultados fundamentais para a monitorização integrada e digital das pedreiras. Após anos de investigação e desenvolvimento de algoritmos dedicados ao processamento automático e inteligente dos seguintes resultados: mapas 2D georreferenciados de alta resolução, modelos 3D de alta qualidade, cálculo de volumes com recurso a AI. Este processo é totalmente automatizado, e parametrizado pelo utilizador.



► Figura A.1.4 Análises detalhadas dos dados recolhidos para cálculos de volume, monitoramento de área e acompanhamento do progresso do projeto com dados atualizados e precisos.

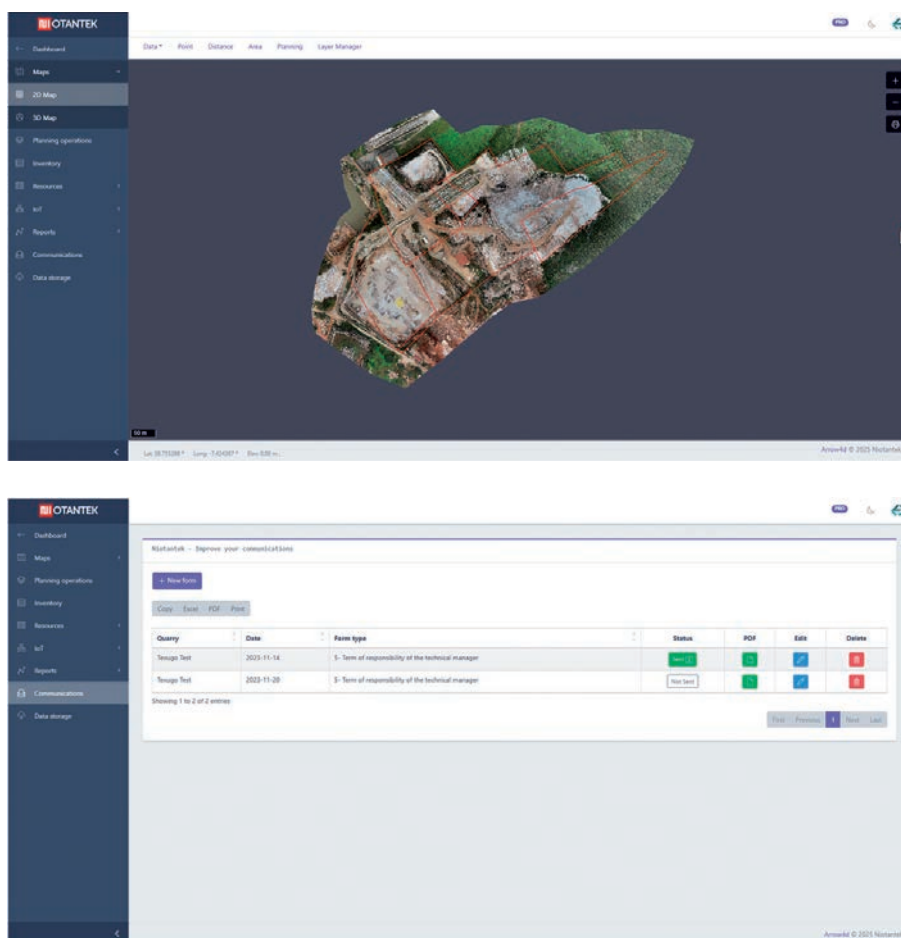
## NIOTANTEK® MRP

A plataforma **NIOTANTEK® MRP** funciona em ambiente *cloud*, e permite a gestão integrada através de mapas 2D iterativos e bases de dados, e monitorização ao longo do tempo de todas as operações da sua pedreira, mina ou obra de construção civil.

A **NIOTANTEK® MRP** está capacitada com várias ferramentas, nomeadamente:

- O **módulo de mapas 2D** é baseado na tecnologia *WebSIG*, o que permite desenhar qualquer geometria georreferenciada, e planear operações de extração de recurso mineral. Os mapas são fornecidos pela tecnologia **NIOTANTEK® GEOMAP**;
- O **módulo de mapas 3D** admite a visualização do modelo 3D da pedreira dos levantamentos efetuados e gravados nas bases de dados na **NIOTANTEK®**;
- O **módulo de planeamento de operações** é a ferramenta ideal para gerir todo o processo extrativo na cavidade da pedreira. Esta ferramenta permite planear as áreas e volumes de extração das bancadas, com recurso a desenho no módulo 2D das áreas a interencionar, e acompanhar a evolução do processo até a remoção total da bancada. Com base nesta ferramenta é possível medir o tempo de extração de cada bancada, e estimar com maior rigor a rentabilidade de cada bancada, e da sua pedreira em geral. Com base no registo das operações poderá ser estimado as emissões de CO<sub>2</sub>;
- Com base no **módulo inventário** é possível a criação da ficha técnica dos produtos e sub-produtos em bases de dados com vários parâmetros, entre os quais, características da qualidade do bloco, geometria, visualizadores 2D e 3D do bloco, emissões de CO<sub>2</sub>, e rastreio do bloco através da localização geográfica. Sendo, o único software no mundo que garante a rastreabilidade dos blocos desde a sua origem até a saída de fábrica;
- O **módulo IoT** é uma opção do software que permite a integração de outros sensores através de API. Ou seja, é possível ligar sensores de medição de energia, sensores de ligar/desligar remotos, sensores para analisar a estabilidade de taludes, entre outros. Com base nos resultados destes sensores é possível otimizar ou monitorizar operações ou máquinas, de modo a otimizar processos ou evitar avarias em máquinas, e reduzir emissões de CO<sub>2</sub>;
- O **módulo relatório** tem um conjunto de ferramentas que permite analisar as operações de extração em gráficos ou tabelas ao detalhe. Esta ferramenta tem vários filtros que permite ao utilizador analisar os resultados de diferentes perspetivas ou parâmetros, de modo a avaliar a evolução do seu negócio;
- O **módulo comunicações** é uma ferramenta que dispõe de vários formulários digitais baseados nas minutas/declarações oficiais da Direção Geral da Energia e Geologia (DGEG). O utilizador pode preencher os formulários que precisar, gravar na *cloud*, assinar, e submeter para a DGEG. Toda a informação fica gravada e disponível na *cloud* da **NIOTANTEK® MRP**;

- O módulo armazenamento permite ao utilizador verificar quais os dados que tem disponíveis na NIOTANTEK® MRP, e verificar qual a quota de utilização da mesma.



- ▶ Figura A.1.5 Na plataforma NIOTANTEK® mapas 2D, 3D e cálculos de volume são automaticamente disponibilizados. Todos os utilizadores podem visualizar, editar, eliminar e partilhar dados de qualquer parte do mundo.

## NIOTANTEK® MASTER

A **NIOTANTEK® MASTER** é um conjunto de tecnologias (**Drone + GEOMAP + MRP**) que permite às empresas automatizar, mapear e monitorizar a sua unidade de produção de acordo com as suas necessidades, e gerir de acordo com os resultados.

Com base neste conjunto de tecnologias todo o processo de mapeamento 3D é automatizado, basta escolher um drone adequado às suas necessidades, e adquirir as licenças **NIOTANTEK® GEOMAP** e **MRP**.

Temos técnicos especializados que dão todo o suporte e formação especializada para utilização destas ferramentas tecnológicas.

Esta tecnologia irá reduzir drasticamente as emissões de CO<sub>2</sub> produzidas pela frota de viaturas da **NIOTANTEK®**, bem como, aumentar a rapidez de entrega de resultados, no máximo 24h.

A fim de minimizar o impacto associado ao ambiente e em conformidade com os seus princípios e práticas de gestão sustentável, asseguramos o cumprimento dos requisitos legais, bem como outros requisitos que a organização subscreve.

## Referências

- G. Goudouva, P. Loizia, V. Inglezakis, e A. A. Zorpas, "Quarries environmental footprint in the framework of sustainable development: the case study of Milos island," *Desalination and Water Treatment*, vol. 133, pp. 307-314, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.5004/dwt.2018.23087>
- Eigenrieden Quarry: Climate neutrality in the extraction of raw material, 31-Jul-2024. Disponível em: <https://work-on-progress.strabag.com/en/carbon-emissions/eigenrieden-quarry>
- Environmental Product Declaration for aggregates from Nyrand gravel pit – Svebølle, 31-Jul-2024. Disponível em: <https://api.environdec.com/api/v1/EPDLibrary/Files/663ebd25-0b69-42ef-fb99-08d9bd3aaab3/Data>
- Environmental Product Declaration for limestone aggregates Xirorema Quarry, 31-Jul-2024. Disponível em: [https://interbeton.gr/wp-content/uploads/2023/07/EPD\\_Latomeio-Xirorematos.pdf](https://interbeton.gr/wp-content/uploads/2023/07/EPD_Latomeio-Xirorematos.pdf)
- T. Hristova, "The place of the blockchain in the recycling of raw materials," in *2022 8th International Conference on Energy Efficiency and Agricultural Engineering (EE&AE)*, pp. 1-4, Jun. 2022. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9831300>
- Y. Jiao, "Analysis of the impacts of carbon dioxide emission on climate change," *Theoretical and Natural Science*, vol. 7, pp. 120-127, 2023. doi: <https://doi.org/10.54254/2753-8818/7/20230123>
- M. Klanfar, T. Korman, e T. Kujundžić, "Fuel consumption and engine load factors of equipment in quarrying of crushed stone," *Tehnički Vjesnik*, vol. 23, no. 1, pp. 163-16, 2016.

## A.2. Processos Sustentáveis no Transporte e Extração de Pedra

João Carlos Santos

STET – Sociedade Técnica de Equipamentos e Tratores, S.A.

### Desafios do setor

Dizem-nos regularmente:

- Como é difícil encontrar operadores, formá-los e mantê-los;
- Embora a segurança faça parte da cultura da maioria das empresas, ainda se deparam com demasiados incidentes ou quase-acidentes e com a perda de eficiência no local de trabalho;
- Para se manter competitivo, precisa não só que o seu operador seja produtivo, mas também que tire o máximo partido dos seus equipamentos para criar uma maior eficiência e aumentar a produtividade;
- Por último, está a enfrentar desafios para reduzir as suas emissões de CO<sub>2</sub> e reduzir o impacto no ambiente.



► Figura A.2.1 Desafios do setor.

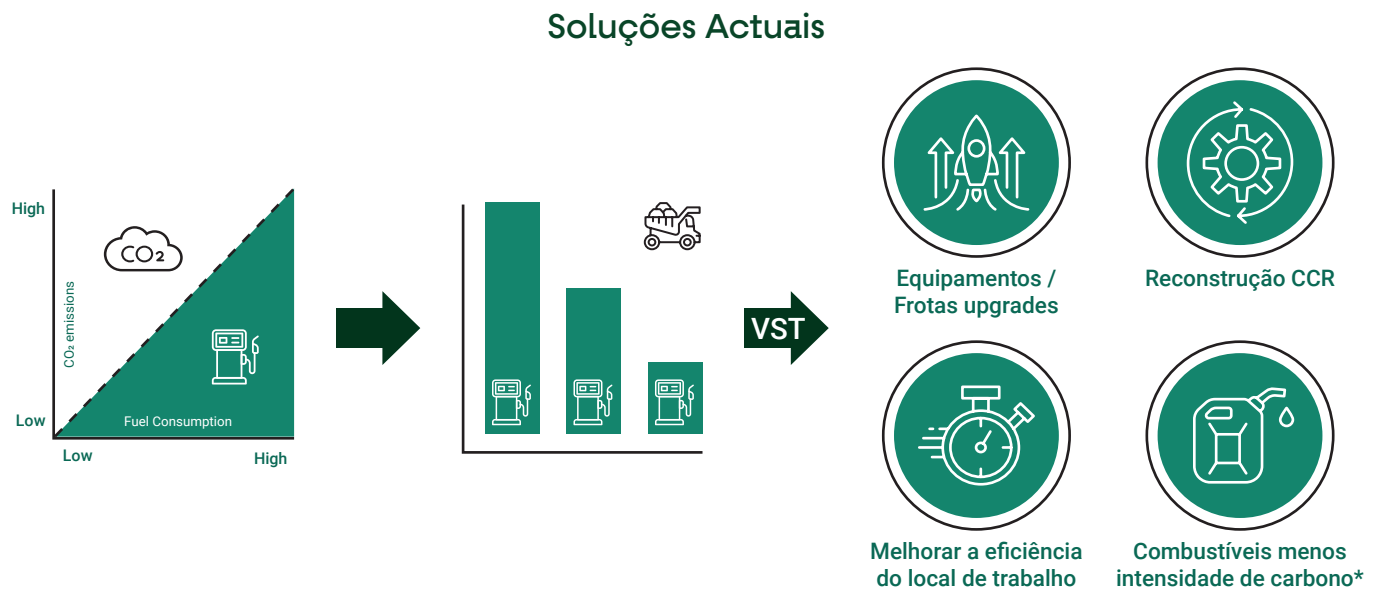
É neste último ponto que nos vamos focar, com a uma vasta gama de equipamentos e soluções para melhorar a eficiência, a produtividade e reduzir a pegada carbónica dos seus produtos finais.

A forma como o podemos ajudar a atingir os objetivos de sustentabilidade dos nossos clientes com equipamentos e soluções Caterpillar, continuando a investir em novos produtos, tecnologias e serviços que facilitam a flexibilidade de combustível, o aumento da eficiência operacional e a redução das emissões. Estratégia empresarial onde a sustenta-

bilidade é uma área de foco prioritária, juntamente com a excelência operacional, ofertas e serviços alargados - dadas as oportunidades apresentadas pela transição energética.

O objetivo é dar-lhe algumas orientações de como estamos a apoiar os nossos clientes na sua jornada de sustentabilidade com soluções atuais que pode implementar hoje, e também sobre as soluções orientadas para a sustentabilidade em que estamos a trabalhar para um futuro próximo.

### Soluções atuais - quatro vetores pragmáticos atuais e que se podem aplicar hoje



\*Utilizando a avaliação do ciclo de vida, as emissões de GEE variam consoante a matéria-prima e a entrega utilizada. Consulte o seu fornecedor de combustível para obter mais informações. A utilização de biodiesel ou HVO em vez de gasóleo de petróleo ajudará a reduzir as emissões de GEE durante o ciclo de vida.

► Figura A.2.2 Jornada descarbonização - soluções atuais CAT.

1) Atualizar um equipamento ou frota, com utilização das tecnologias mais recentes para reduzir o consumo de combustível e emissões CO<sub>2</sub>.

Equipamentos elétricos e híbridos (com designação XE).

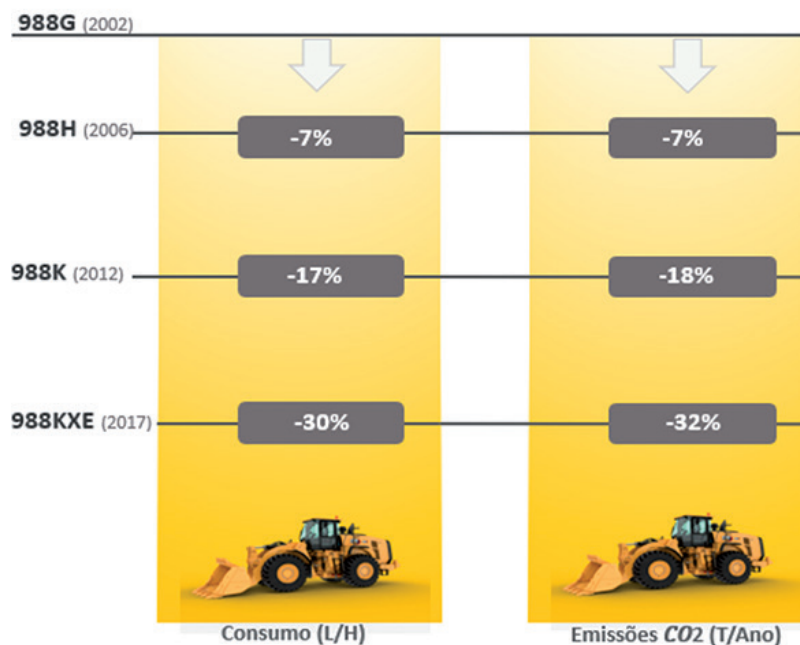
Para além da evolução dos equipamentos, várias características tecnológicas a bordo, de série e opcionais, foram incorporadas nos equipamentos para os tornar mais produtivos e eficientes.

Soluções elétricas com o lançamento de vários modelos de equipamentos elétricos, alimentados por bateria, equipados com carregadores adicionais também alimentados por bateria.

Soluções híbridas, com o lançamento de vários modelos com sistema de transmissão híbrido (XE), utilizam uma transmissão elétrica para uma melhor eficiência energética e produtividade ao fornecerem uma potência constante que confere uma maior capacidade de manobra, com tempos de ciclo mais rápidos e com menor consumo.



► Figura A.2.3 Alguns equipamentos elétricos do portefólio CAT.



► Figura A.2.4 Evolução emissões equipamento 988 até modelo XE – Híbrido.

## 2) Serviço de telemetria, só consegue melhorar o que mede:

Melhorar a eficiência do seu local de trabalho utilizando os dados do *VisionLink*, com a monitorização de indicadores como a inatividade de equipamento, consumo de combustível e emissões de CO<sub>2</sub>. Pode ser utilizada para estimar o impacto financeiro das emissões de CO<sub>2</sub> e de combustível, e permite cenários de soluções como a atualização de máquinas/frota e a melhoria da gestão dos tempos de inatividade.

O *VisionLink* permite identificar tendências de dados e monitorizar o consumo de combustível, com a informação em tempo real das emissões estimadas de CO<sub>2</sub>.

Para além da gestão e monitorização via *VisionLink*, outras duas soluções complementares ajudam a reduzir o consumo de combustível e as subsequentes emissões de dióxido de carbono:

- Formação de operadores - Um operador qualificado e sensibilizado pode ser significativamente mais eficiente em termos de consumo de combustível do que um operador não qualificado. A título de exemplo, um operador experiente 10 anos de experiência é cerca de 30% mais eficiente em termos de consumo de combustível do que um operador novato com menos de 5 anos de experiência numa aplicação de carregamento de camiões;



- Configuração do local de trabalho e equipamento – serviço de avaliação e assessoria para ajudar a melhor configurar o local de trabalho/pedreira e o fluxo de máquinas ao longo do local de trabalho, para minimizar as operações.

### 3) Serviços de recuperação e reconstrução apoiam a sustentabilidade e a economia circular

Prolongar a vida útil dos equipamentos com o programa de Reconstrução Certificada aumenta a vida útil do equipamento, fornecendo aos clientes atualizações de produtos por uma fração do custo de compra de um equipamento novo, permitindo-nos prolongar a vida útil dos materiais. Uma Reconstrução Certificada completa inclui mais de 350 testes

e inspeções, com substituição ou recondição automático de aproximadamente 7.000 peças e uma garantia de máquina como nova.

Desde 1985, foram abrangidos por este programa mais de 43.000 equipamentos.



► Figura A.2.5 Reconstrução equipamento CAT REMAN.

#### 4) Utilização de combustíveis alternativos, com menor intensidade de carbono, que têm o potencial de reduzir as emissões de gases com efeito de estufa ao longo do ciclo de vida.

Os combustíveis alternativos, com uma intensidade (ou pegada) de carbono inferior à do gasóleo convencional, têm o potencial de reduzir as emissões de dióxido de carbono ao longo do ciclo de vida da sua frota. Os dois combustíveis alternativos, disponíveis no mercado, são o biodiesel e o HVO (óleo vegetal tratado com hidrogénio). É importante deixar claro que a utilização de biocombustíveis não impacta substancialmente as emissões de CO<sub>2</sub> pelo sistema motor. A redução potencial de dióxido de carbono baseia-se numa análise do ciclo de vida. O crescimento das culturas de matérias-primas absorve o CO<sub>2</sub>, compensando uma percentagem do CO<sub>2</sub> libertado pela combustão.

A começar pelo HVO. A Caterpillar vê o HVO como um substituto do gasóleo normal. Desde que cumpra a especificação do combustível, pode ser utilizada a 100% em equipamentos Caterpillar, sem impacto no normal funcionamento e eficiência do motor.

#### Sobre a STET

A STET, Sociedade Técnica de Equipamentos e Tractores, SA, centra a sua atividade na comercialização, aluguer, fornecimento de peças e assistência técnica a clientes com Máquinas, Geradores e Motores Marítimos. Parceira reconhecida no fornecimento e apoio dos seus clientes em setores

O biodiesel é quimicamente diferente do gasóleo convencional, tem características diferentes, é por isso, frequentemente misturado com o gasóleo convencional. Até B20 (20% de biodiesel, 80% de gasóleo convencional) é aceitável na maioria dos motores Caterpillar. O biodiesel B100, ou biodiesel puro, é aceitável em alguns modelos de motores sem sistemas de pós-tratamento.

A qualidade do combustível é o principal fator para o êxito do funcionamento dos biocombustíveis. O biodiesel tem características diferentes do gasóleo convencional, no que diz respeito à sua estabilidade e armazenamento. O desafio que se coloca atualmente para a utilização de HVO e biodiesel, é o volume de abastecimento disponível e o custo de aquisição.

tão diversos como: construção, pedreiras, minas, agricultura, floresta, tratamento de lixo e sucata e projetos que envolvam a aplicação de diferentes soluções de fornecimento de energia terrestre e ou marítima.

### A.3. Processos e Tecnologias Sustentáveis na Extração de Pedra

Joana Frazão; Inês Frazão; Eliseu Frazão

FRAVIZEL – Equipamentos Metalomecânicos, S.A.

A mineração e a extração de pedreiras são indústrias essenciais que fornecem as matérias-primas necessárias para muitos aspetos da vida moderna. Estas indústrias surgem como uma oportunidade para a sustentabilidade. A utilização da pedra é um dos produtos com mais valor acrescentado da economia e dos mais sustentáveis (dura uma vida toda) e o exemplo perfeito de economia circular. Tudo é aproveitado neste setor seja, para o setor da construção (edifícios, estradas), bem como outras indústrias (farmacêutico, cosmética, alimentar).

Com a crescente procura por recursos, a extração é uma das poucas opções viáveis remanescentes para a maioria das economias globais. A sociedade em geral necessita de recursos minerais e tecnologia para desenvolver o tecido económico, de criação de emprego e de desenvolver os jovens para a tecnologia. No entanto, é possível inovar e aumentar a produtividade sem romper com as práticas estabelecidas e com as tecnologias disponíveis.

Existem empresas do Setor da pedra natural dedicados ao setor extrativo em todo o mundo, a nível nacional são cerca de 2500 entidades e a nível europeu 40.000 empresas.

Na Europa, há um compromisso crescente de reduzir as emissões e alcançar a neutralidade carbónica até 2050, com muitos países estabelecendo metas ambiciosas de descarbonização. A eletrificação será o caminho mais importante, além disso, o aumento da produtividade e a hibridação com diesel/elétrico será uma solução a curto-médio prazo para diminuir as emissões de GEE por volume extraído [1]. Espera-se que a descarbonização do setor à medida que o setor caminha para um futuro de baixo carbono, traga novas capacidades, tecnologias e formas de trabalho, o que exigirá investimentos em qualificação e requalificação da força de trabalho. O impacto socioeconómico local desempenha um papel fundamental no desenvolvimento desta indústria [2]. Segundo estudo realizado sobre as competências digitais necessárias a este setor, as que se destacam são as competências técnicas de gestão de informação e as competências de natureza contextual como a consciência ética, flexibilidade e autonomia [3].

## Quem

Com 40 anos de história a Fravizel, desenvolve, produz e dá assistência à tecnologia que desenvolveu. Tem uma fábrica com mais de 34.000 m<sup>2</sup> e equipa com mais de 150 pessoas. Possui estatuto de idoneidade, mais de 90 processo de propriedade intelectual e ganhou o prémio PME inovação da CO-TEC-BPI em 2024.

A empresa desenvolve e fabrica inovação sustentável (social, económica e ambiental) para os setores extrativos. Procura facilitar o trabalho ao operador, proporcionando-lhe boas condições, segurança e atratividade tecnológica para o trabalho (sustentabilidade social). Defende a inovação como alavanca para uma boa gestão do tempo e produtividade (sustentabilidade económica). Promove a economia circular e a tecnologia híbrida (sustentabilidade ambiental).

## Como

Inovar implica investir muitos recursos e fazê-lo no tempo certo e com ganhar tempo ao tempo. Com isto em mente concentramo-nos em acrescentar valor em todas as fases no processo de exploração (Perfuração, Corte, Derrube e Esquadrejamento e Economia Circular).

Nos últimos anos, a Fravizel lançou tecnologias híbridas e telecomandadas (Figura A.6) para o setor da extração de pedra como a Electra (Máquina de

A Fravizel tem investido fortemente na descarbonização da indústria extrativa, desenvolvendo soluções que possibilitam ganhos de produtividade, eficiência energética e redução das emissões de carbono, em linha com as metas do Pacto Verde Europeu.

Combinando a eficiência produtiva e a responsabilidade ambiental, a Fravizel desenvolveu máquinas com tecnologia híbrida que melhoram a segurança dos trabalhadores, aumentam a produtividade e reduzem a pegada carbónica.

A Fravizel acredita que a receita para descarbonizar é através da eficiência (fazer acontecer rápido), da redução de custos, da valorização do produto e da economia circular.

Fio), a Victoria (Máquina de Perfuração) e Aurora (Máquina de Perfuração), que permitem uma elevada eficiência energética e igualmente aumentar a produtividade em toda a cadeia de valor. Estas máquinas permitem aumentar a quantidade e a qualidade da pedra extraída. A inovação permite uma maior eficiência no corte e processamento da pedra através da adaptação à bancada, reduzindo assim os desperdícios.



### LINHA MOBILE

Mobilidade | Eficiência Energética | Digitalização | Redução de Custos

 AURORA



 VICTORIA



 ELECTRA



### Neutralidade Climática e Transição Digital

até **-81%**  
Energia

até **-87%**  
Emissões (tonCO<sub>2</sub>)

até **-70%**  
Energia

até **-76%**  
Emissões(tonCO<sub>2</sub>)

até **-82%**  
Energia

até **-85%**  
Emissões (tonCO<sub>2</sub>)

► Figura A.3.1 Tecnologias Fravizel na descarbonização.

Dependendo das soluções escolhidas e das condições operacionais, as tecnologias da Fravizel podem reduzir em até 87% as emissões de carbono (CO<sub>2</sub>) e os custos com energia até 82%. Este valor não tem em conta o aumento da quantidade de produto explorado a mais, a redução dos custos de exploração e de manutenção e o aumento da eficiência do processo logístico (transportar apenas o que importa através da produção do produto final logo no início da cadeia de valor - pedra e da digitalização dos dados que permite transportar apenas o que interessa).

Quando aliadas a fontes de energia 100% renováveis, as reduções tornam-se ainda mais significativas, alinhando-se com as metas da União Europeia de reduzir as emissões de gases com efeito de estufa em 55% até 2030. O setor e a sociedade usufruem desta descarbonização.

Também com linhas automatizadas de economia circular (prensas até 1000 toneladas) e com máquinas de seixo rolado (Figura A.7), que permitem aproveitar o recurso e criar produtos de elevado valor através da economia circular.

## FRAVIZEL CIRCULAR ECONOMY MACHINES

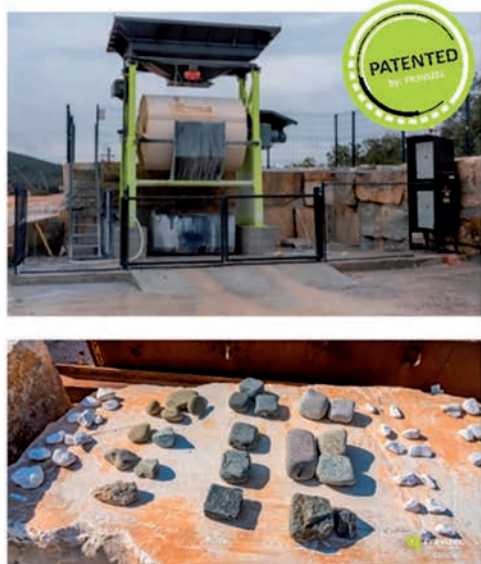
### ECONOMIA CIRCULAR FRAVIZEL

Mobility | Energy Efficiency | Digitalization | Cost Reduction

Mobilidade | Eficiência Energética | Digitalização | Redução de custos

 TORUS

 LUNA



► Figura A.3.2 Tecnologias Fravizel na Economia Circular.



## Onde

No acordo verde (*Green Deal*) a Fravizel foca-se em 5 eixos, atingir a neutralidade climática, transporte sustentável, transição para a economia circular,

energia limpa e fiável e na transição justa, não deixar ninguém para trás (Figura A.8).



► Figura A.3.3 Green Deal na Fravizel. (Source: The European Committee of the Regions (2021))

A Fravizel não apenas melhora a eficiência e a segurança no setor da rocha natural, mas também promove um modelo de produção (com cabine que permite aceder remotamente e manobrar a tecnologia sejam homens ou mulheres) que valoriza as pessoas e o planeta, mostrando como a tecnologia pode ser usada para criar um futuro mais sustentável e humanizado.

A integração de soluções digitais permite, ainda, otimizar a gestão e reduzir o desperdício e, através da plataforma Fravizel ON (Figura A.9), os operadores podem aceder remotamente às máquinas, promovendo um ambiente de trabalho mais seguro e informado, pois através da plataforma terão acesso a todos os dados de produção em tempo real.



► Figura A.9. Fravizel ON.

As soluções remotas permitem acelerar operações e transformar dados em conhecimento, refletindo a inovação tecnológica, característica da indústria 4.0, a preocupação da Fravizel com o bem-estar dos trabalhadores alinha-se com os objetivos da indústria 5.0, promovendo um modelo de produção que valoriza as pessoas e o planeta. Estas soluções já são utilizadas em Portugal e exportadas para mais de 60 países.

Não só estas tecnologias permitem uma redução de custos como permitem a descarbonização de uma cadeia de valor de uma indústria primária e essencial à sociedade. O setor dos recursos minerais desempenha um papel crucial na construção e na eletrificação de todas as indústrias e ganha vantagens competitivas ao adotar práticas sustentáveis e digitalizadas.

## Porquê

Acreditamos que o processo da descarbonização pode ser acelerado através de boas práticas da Indústria 6.0 como a integração de tecnologias digitais avançadas como automação, robótica, inteligência artificial e outras tecnologias emergentes para otimizar processos industriais. Da colaboração com a academia envolvendo parcerias estratégicas entre empresas, universidades e centros de conhecimento para fomentar a inovação e o desenvolvimento tecnológico. Do foco na sustentabilidade, promovendo práticas que equilibram o crescimento económico com a responsabilidade ecológica e social, alinhando-se com os princípios

ESG (*Environmental, Social, and Governance*). E da personalização e bem-estar humano com a busca em adaptar produtos e serviços às necessidades individuais dos consumidores, ao mesmo tempo que valorizem o bem-estar dos trabalhadores e a qualidade de vida.

A longo prazo, a Fravizel pretende consolidar-se como referência na descarbonização do setor extrativo a nível mundial provando que a inovação tecnológica pode ser um motor de transformação para um futuro mais sustentável, eficiente e humanizado.

## Quando?

AGORA!

## Referências

- [1]. J. L. Frazão, I. P. Frazão, e J. P. Frazão, "Desafios da descarbonização em pedreiras de pedra natural," in 7º Global Stone Congress 2023, Batalha, Portugal, 18-23 Jun. 2023.
- [2]. UN, "Desenvolvimento sustentável e mudanças

- climáticas," Disponível em: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/climate-change/>
- [3]. J. P. Frazão, "Evolução da Força de Trabalho do Setor dos Recursos Minerais no início da Era Digital," Tese de doutoramento, ISCTE-IUL, 2019.



Promotor



**ASSIMAGRA**  
RECURSOS MINERAIS DE PORTUGAL

Equipa técnica



**CTCV**



**PRR**  
Plano de Recuperação  
e Resiliência



**REPÚBLICA  
PORTUGUESA**



Financiado pela  
União Europeia  
NextGenerationEU