



ROAD TO 2050
ROTEIRO PARA A DESCARBONIZAÇÃO
DO SETOR DA PEDRA NATURAL

Roteiro para a Descarbonização do setor da Pedra Natural

Sumário executivo







Roteiro para a Descarbonização do setor da Pedra Natural

Sumário executivo

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

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:

Slideshow - Creative Agency

O documento aqui apresentado constitui uma súmula da informação contida no **Roteiro para a Descarbonização do Setor da Pedra Natural**, elaborado no âmbito do projeto **ROADto2050**, promovido pela ASSIMAGRA – Associação Portuguesa da Indústria dos Recursos Minerais em parceria com o CTCV – Centro Tecnológico da Cerâmica e do Vidro, no âmbito do Plano de Recuperação e Resiliência (PRR). No roteiro constam os contributos de diversos especialistas e entidades em diferentes ramos de actuação.

índice

Mensagem da EUROROC - Federação Europeia e Internacional das Indústrias de Pedra Natural	06
Preâmbulo.....	08
01 Introdução	11
02 Diagnóstico do Setor.....	19
03 Principais tecnologias de descarbonização para o setor	27
04 Evolução prevista para o setor.....	45
05 Potencial de descarbonização 2025 a 2050	51
06 ROADTOZERO - Stone Carbon Calculator.....	57
07 Capacitar para a descarbonização.....	61
08 Considerações finais	67
Especialistas e entidades convidadas.....	70

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 14.200 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 mesma pode ofere-

cer. 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 da terra, 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 das 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 ROADto2050 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 potenciais 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)



Preâmbulo

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 carbônica.

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 Carbônica 2050 (RNC2050) 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 carbônica 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 CO₂ 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 corporativa 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 intervenientes neste 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)





01.

Introdução





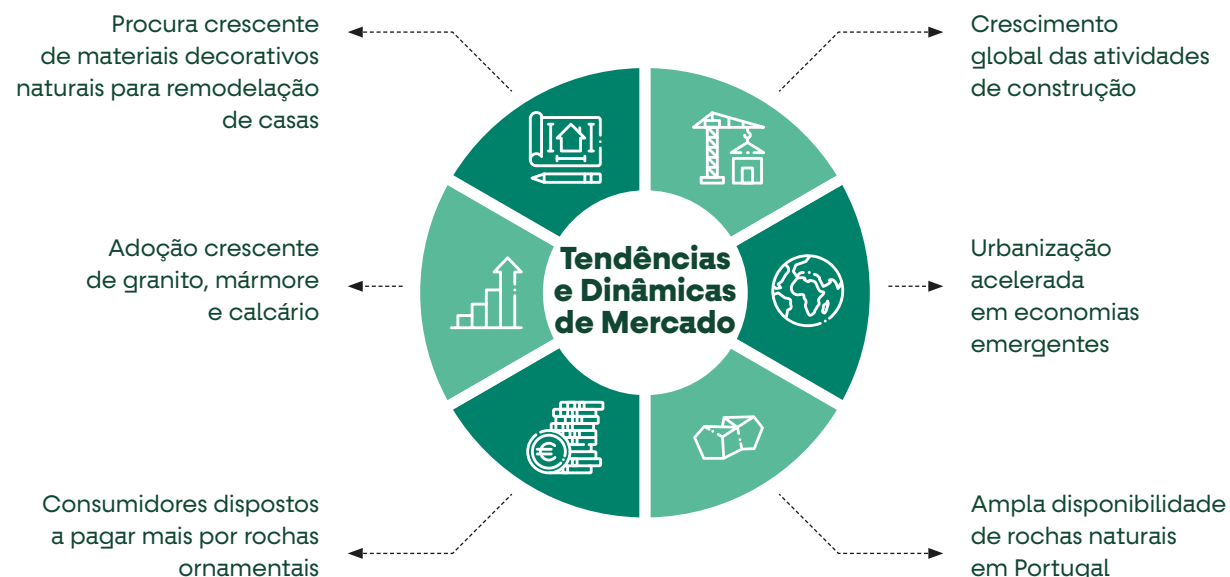
O setor da Pedra Natural é um pilar relevante da economia portuguesa, combinando tradição, modernização tecnológica e elevado valor comercial. A sua competitividade depende da gestão eficiente dos recursos, da qualidade dos processos e da valorização do produto final, sendo essencial garantir a sua sustentabilidade ambiental e económica.

Este setor engloba empresas que se dedicam à extração de pedra natural, à sua transformação, ou a ambas as atividades em simultâneo. As rochas são extraídas sob a forma de blocos ou placas, sendo depois cortadas e submetidas a processos de acabamento.

As principais utilizações da pedra natural incluem pavimentos e revestimentos, tanto em espaços interiores como exteriores, bem como a criação de peças individuais, como esculturas, tampos, balcões, bases de mesas e lápides para arte funerária.

Apesar de cada empresa ajustar o seu processo produtivo às características da matéria-prima e ao produto final pretendido, esses processos tendem a incluir operações unitárias e auxiliares semelhantes, recorrendo a equipamentos comparáveis.

Segue-se uma descrição simplificada das principais fases dos processos de extração e transformação da Pedra Natural.



► Principais fatores, tendências e mercados da indústria portuguesa de Pedra Natural (Fonte: Almeida e Da Silva, 2024" para "Almeida, I., & da Silva, A., 2024)

A indústria da Pedra Natural

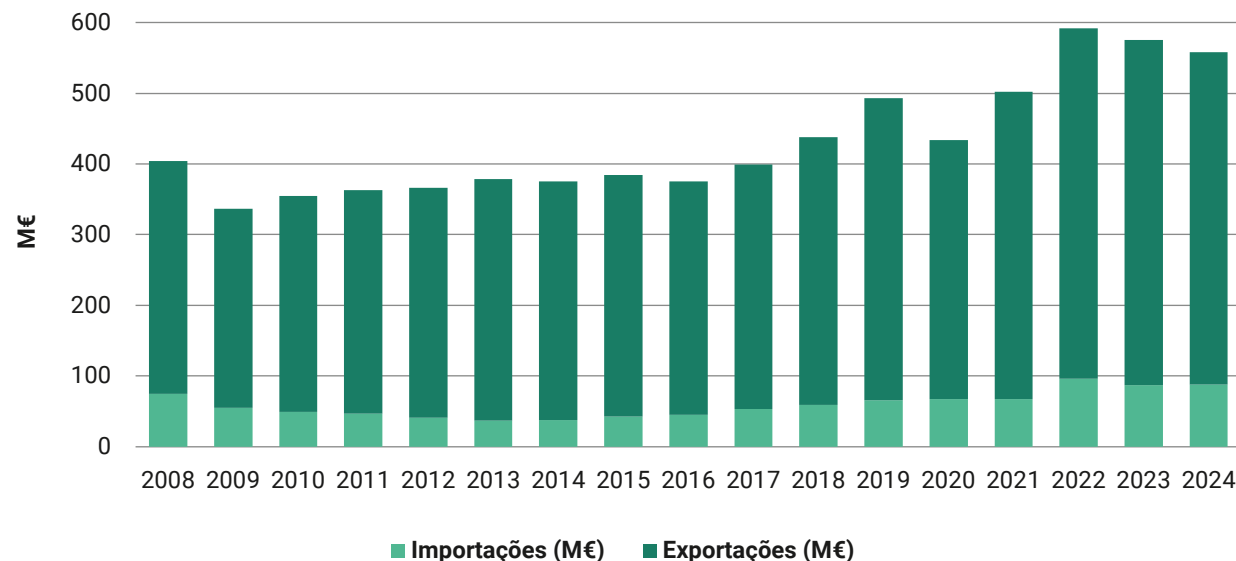
O setor da Pedra Natural em Portugal tem uma longa tradição ligada à construção, ao artesanato e ao património arquitetónico, sendo parte integrante da identidade geológica e cultural do país. A sua modernização ganhou novo impulso a partir de 1980, com a adesão de Portugal à então Comunidade Económica Europeia, que proporcionou acesso a novos mercados e a instrumentos de financiamento comunitário. Estes fatores favoreceram o investimento em tecnologia, qualificação dos recursos humanos e estratégias de internacionalização.

Nas décadas seguintes, o setor evoluiu de uma atividade centrada sobretudo na extração de blocos para uma lógica de maior valor acrescentado, assente na transformação industrial, na inovação de produto e na diferenciação estética e funcional pedra natural. Atualmente, a fileira abrange toda a cadeia de valor - desde a extração em pedreiras até à transformação e comercialização - com forte incorporação de tecnologia como maquinaria CNC, equipamentos robotizados e técnicas de corte e acabamento de elevada precisão.

Em 2024, segundo a ASSIMAGRA, o setor da Pedra Natural em Portugal:

- Emprega **mais de 14.200 trabalhadores diretamente**, com expressão significativa em territórios do interior;
- É composto por **cerca de 2.260 empresas**, distribuídas maioritariamente pelos distritos de Santarém, Leiria, Évora e Vila Real;

- Exporta para **116 países**, sendo os principais destinos a China, França, EUA, Alemanha e Reino Unido;
- Na última década o volume de exportações médio foi superior em 600% ao das importações, contribuindo de forma muito relevante para a balança comercial nacional;
- Ocupa a **7.ª posição mundial no comércio internacional** de pedra natural (valor absoluto), e é o **2.º maior exportador per capita do mundo**.



► Importações e exportações de pedra natural no período de 2008 a 2024 (Fonte: Assimagra, 2024)

Extração



A extração de blocos de pedra natural pode realizar-se através de lavra a céu aberto, lavra subterrânea ou, em alguns casos, em contextos mistos que combinam ambos os métodos. Em Portugal, esta atividade decorre maioritariamente em pedreiras a céu aberto, ou seja, à superfície, o que se deve à acessibilidade das jazidas e às características geomorfológicas do território nacional.

Antes do início da extração propriamente dita, é necessária uma fase de preparação da pedreira. Esta inclui operações de decapagem do terreno, que consistem na remoção das camadas superficiais, como vegetação, solo, argilas e cascalho, que cobrem o maciço rochoso. Adicionalmente, é necessário proceder ao desmonte de cabeças, de forma a alcançar a rocha sã e compacta, adequada para a extração em blocos.

Nos últimos anos, a tecnologia de corte com fio diamantado tem vindo a substituir gradualmente o uso de explosivos, devido às exigências legais e aos diversos constrangimentos associados à sua utilização. Este método permite uma extração mais precisa, segura e com menor impacto ambiental.

Como resultado da fase de extração, obtêm-se blocos com arestas tendencialmente retangulares e com dimensões adaptadas para maximizar o aproveitamento do recurso rochoso, facilitando simultaneamente as operações subseqüentes na etapa de transformação.

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 pedra natural 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.

Políticas europeias para a descarbonização

A crise climática global tem impulsionado uma intensificação dos esforços a nível internacional para travar o aquecimento global e promover modelos de desenvolvimento mais sustentáveis. Neste cenário, a União Europeia (UE) tem desempenhado um papel de liderança na transição ecológica, através da implementação de políticas e instrumentos legais orientados para a redução das emissões, o fomento das energias limpas e a concretização da neutralidade carbónica.

Principais políticas e instrumentos da UE para o clima:

- **Acordo de Paris** (2015) - Assinado por 195 países na COP21, compromete-se a limitar o aquecimento global a menos de 2°C, com esforços para restringi-lo a 1,5°C face aos níveis pré-industriais.
- **Pacto Ecológico Europeu** (*European Green Deal*) (2019) - Visa transformar a economia da UE num modelo sustentável, inclusivo e resiliente, promovendo neutralidade carbónica até 2050, economia circular, justiça social e energias limpas.
- **Lei Europeia do Clima** (2021) - Torna juridicamente vinculativa a meta de neutralidade climática da UE até 2050, obrigando Estados-Membros e instituições a cumprir objetivos climáticos ambiciosos.
- **Pacote legislativo *Fit for 55*** (2021) - Conjunto de medidas para reduzir pelo menos 55% das emissões líquidas de gases com efeito de estufa até 2030, em relação a 1990, incluindo:

- Revisão e expansão do **Comércio Europeu de Licenças de Emissão (CELE)**, com a criação de um novo sistema de CELE, o CELE 2, que abrange emissões de CO₂ provenientes da queima de combustíveis no transporte rodoviário, edifícios e pequenas indústrias não abrangidas pelo CELE 1.
- **Mecanismo de Ajustamento Carbónico Fronteiriço (CBAM)**, que impõe custos de carbono a produtos importados de países com normas ambientais menos rigorosas do que as da UE.
- **Diretiva de Reporte de Sustentabilidade Corporativo (CSRD)** (2022) - Estabelece regras rigorosas para empresas, exigindo divulgação das emissões de gases com efeito de estufa e planos para alcançar a neutralidade carbónica até 2050.
- **Plano Industrial do Pacto Ecológico** (2023) - Complementa o Pacto Ecológico Europeu, incentivando a competitividade industrial e acelerando a transição para a neutralidade carbónica, através dos programas **REPowerEU**, **InvestEU** e **Fundo de Inovação**. Inclui:
 - **Regulamento Indústria de Impacto Zero (NZIA)** - Promove a produção de tecnologias para descarbonização.
 - **Regulamento das Matérias-Primas Críticas (CRM Act)** - Estabelece medidas para garantir o acesso sustentável e seguro a matérias-primas estratégicas, promovendo a diversificação de

fontes e o reforço da cadeia de abastecimento.

- **Reforma do Mercado da Eletricidade** - Moderniza e integra o sistema elétrico europeu, promovendo estabilidade e transição energética.
- **Pacto da Energia Limpa** (*Clean Industrial Deal*) (2025) - Visa reforçar a competitividade e descarbonização da indústria europeia, especialmente nos setores intensivos em energia, promovendo inovação verde, economia circular e segurança energética, em linha com as metas climáticas da UE.

Políticas ambientais em Portugal

Portugal, como signatário do Acordo de Paris e Estado-Membro da UE, comprometeu-se a alcançar a neutralidade carbónica até 2050, alinhando-se às metas do Pacto Ecológico Europeu. Em 2019, lançou o **Roteiro para a Neutralidade Carbónica 2050 (RNC2050)**, um plano estratégico que define os vetores de descarbonização, políticas e medidas necessárias para reduzir as emissões nos diversos setores da economia.

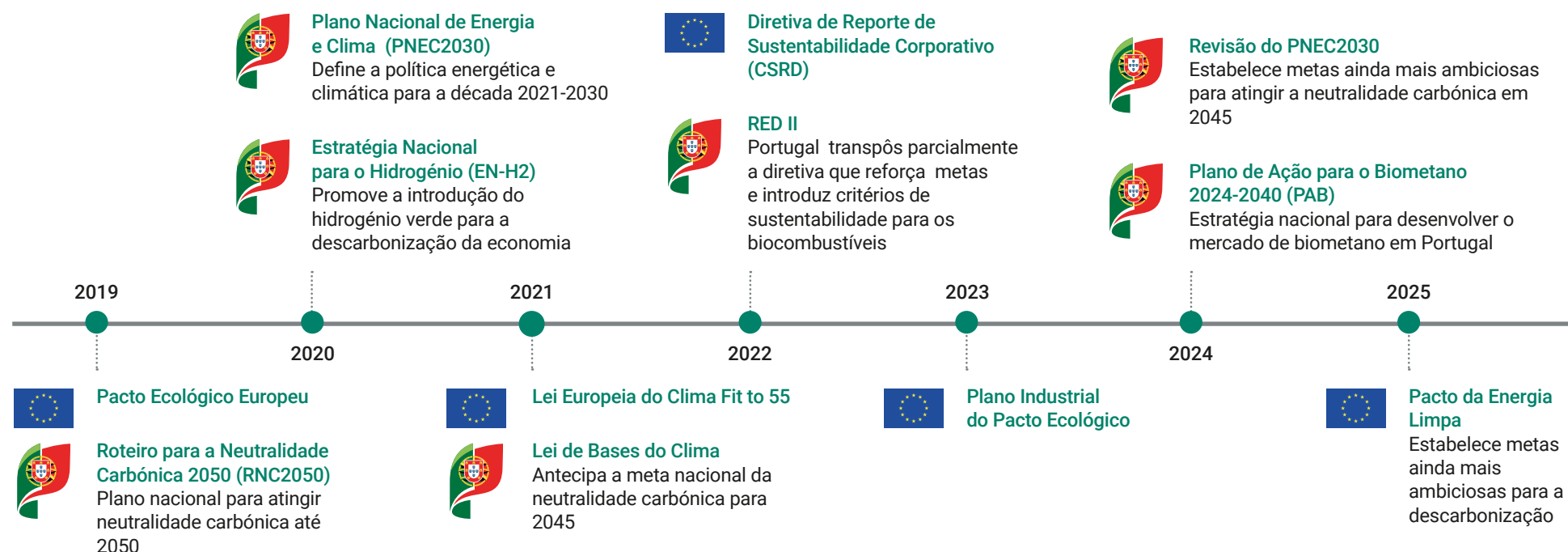
Em alinhamento com o RNC2050, Portugal aprovou em 2020 o **Plano Nacional para a Energia e Clima**

2030 (PNEC2030), que define as metas energéticas e climáticas para 2021-2030. No mesmo ano, foi lançada a **Estratégia Nacional para o Hidrogénio (EN-H2)**, com o objetivo de diversificar a matriz energética, promover o hidrogénio verde e acelerar a transição para uma economia de baixo carbono.

Em 2021, Portugal aprovou a **Lei de Bases do Clima**, que define os princípios e metas para o combate às alterações climáticas, incluindo a possibilidade de antecipar a neutralidade climática para 2045. Em 2022,

Portugal transpôs parcialmente a Diretiva Europeia sobre as Energias Renováveis, RED II (**Decreto-Lei nº84/2022**), que reforça as metas de incorporação dos biocombustíveis e introduz critérios de sustentabilidade para a sua produção.

Em 2024, foi **atualizado o PNEC2030**, com objetivos mais ambiciosos de redução de emissões. No mesmo ano, foi aprovado o **Plano de Ação para o Biometano 2024-2040 (PAB)**, visando o desenvolvimento do mercado de biometano.







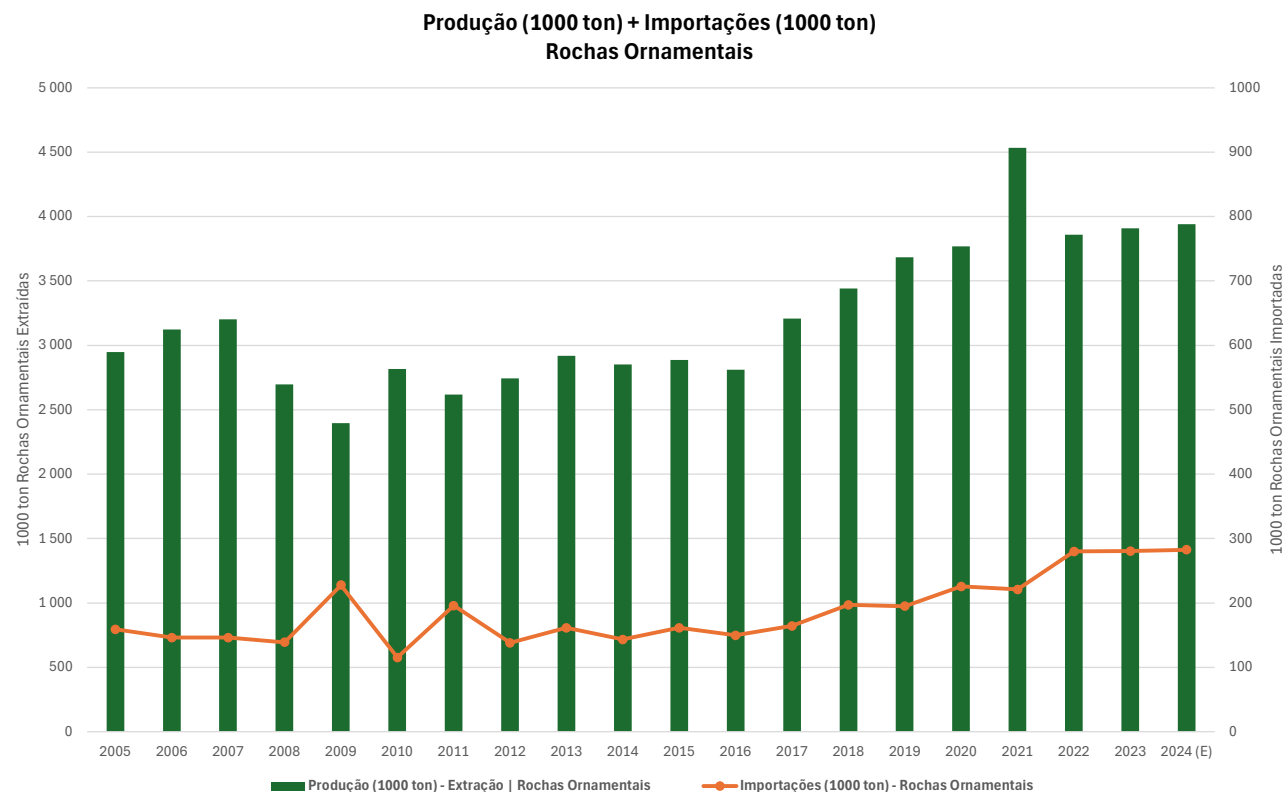
02. Diagnóstico do Setor



Pedra Natural - extração

A evolução da **produção de pedra natural** em Portugal mostra uma **trajetória positiva** ao longo das últimas duas décadas, passando de valores abaixo das 3 milhões de toneladas em 2005 para perto dos 4 milhões de toneladas em 2024 (estimado). Esta tendência reflete um claro reforço da capacidade produtiva do setor, associada à crescente procura internacional por materiais de origem portuguesa, como calcários, mármore e granitos. As previsões até 2050 apontam para uma **continuidade deste crescimento**, embora de forma mais moderada, consolidando a importância estratégica do setor no contexto económico e territorial nacional.

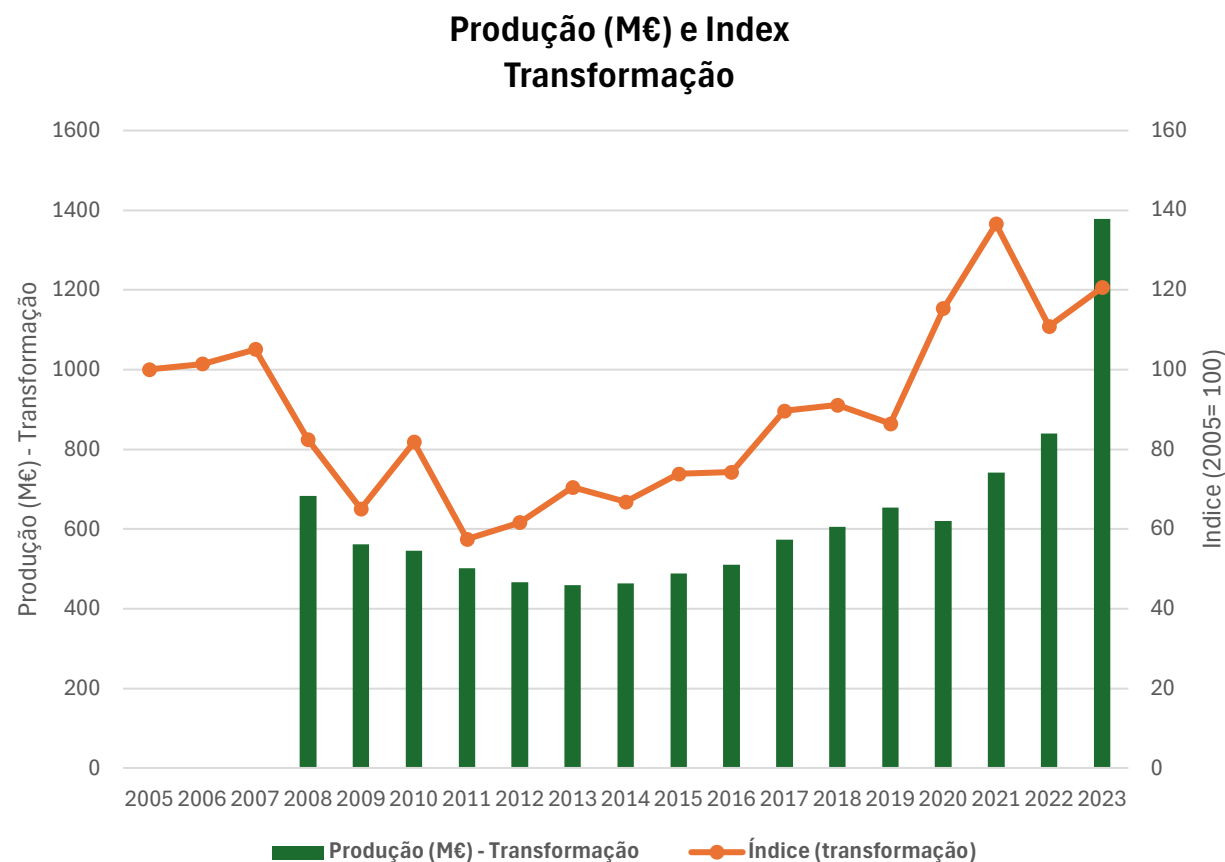
Paralelamente, as importações de pedra natural mantêm-se reduzidas face à “produção” nacional, o que reforça a autossuficiência e competitividade do setor português. Esta balança comercial favorável evidencia o papel exportador da indústria e justifica, em parte, os elevados rácios de exportação *per capita* que Portugal regista neste domínio. O facto de o país importar pouco e extrair grandes volumes de matéria-prima posiciona-o como um fornecedor de referência no mercado global.



- Produção e importações (mil toneladas) de pedra natural extraída no período de 2005 a 2024 (Fonte: Assimagra, INE, DGEG, CTCV, 2024)

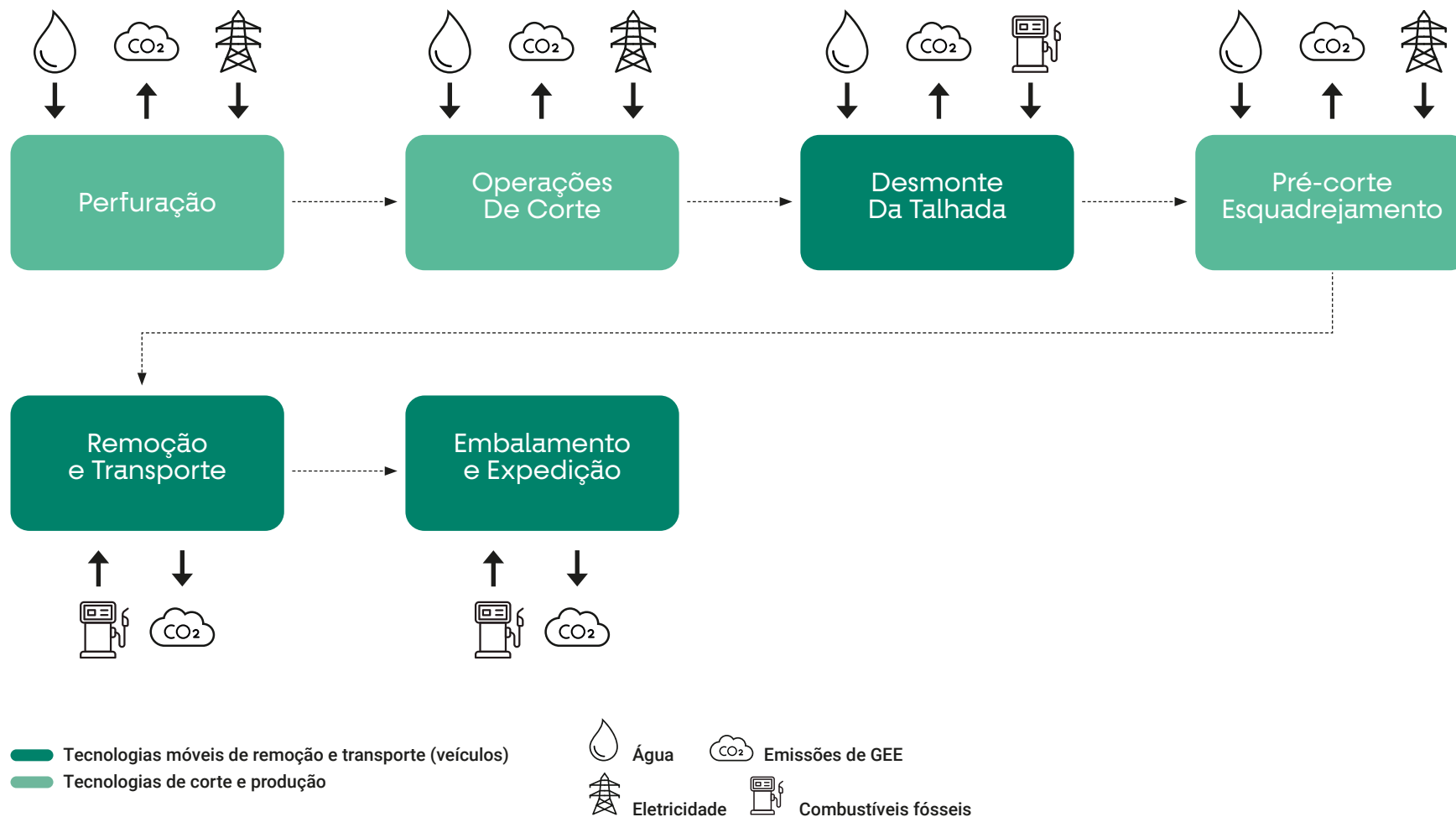
Pedra Natural - transformação

No que respeita à transformação, observa-se uma valorização crescente da pedra natural – não apenas em termos de tonelagem transformada, mas também em valor económico (milhões de euros). Esta tendência evidencia o esforço do setor na criação de maior valor acrescentado, através da inovação tecnológica, do design e da diversificação de aplicações. O aumento paralelo da quantidade de pedra transformada e do valor gerado indica que o setor está a evoluir de uma lógica meramente extractiva para uma lógica de sofisticação industrial, com a colocação no mercado de produtos de valor acrescentado, fundamental para a competitividade do setor e para responder aos requisitos dos mercados mais exigentes, incluindo em critérios ambientais e de sustentabilidade.

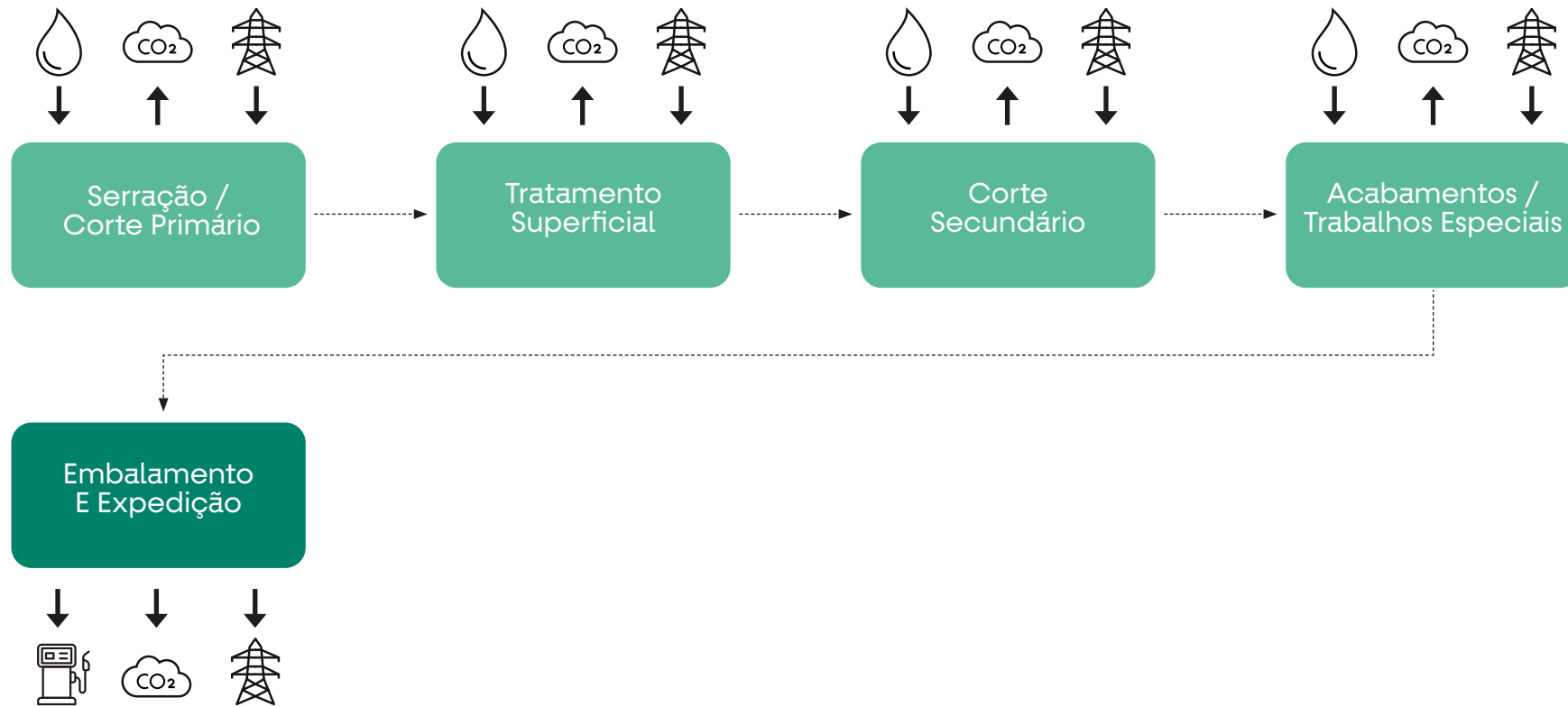


► Produção (milhões de euros) e índice produção (2005=100) de pedra natural transformada no período de 2005 a 2023 (Fonte: Assimagra, CTCV, INE, 2024)

Fontes de GEE no setor da Pedra Natural - extração



Fontes de GEE no setor da Pedra Natural - Transformação



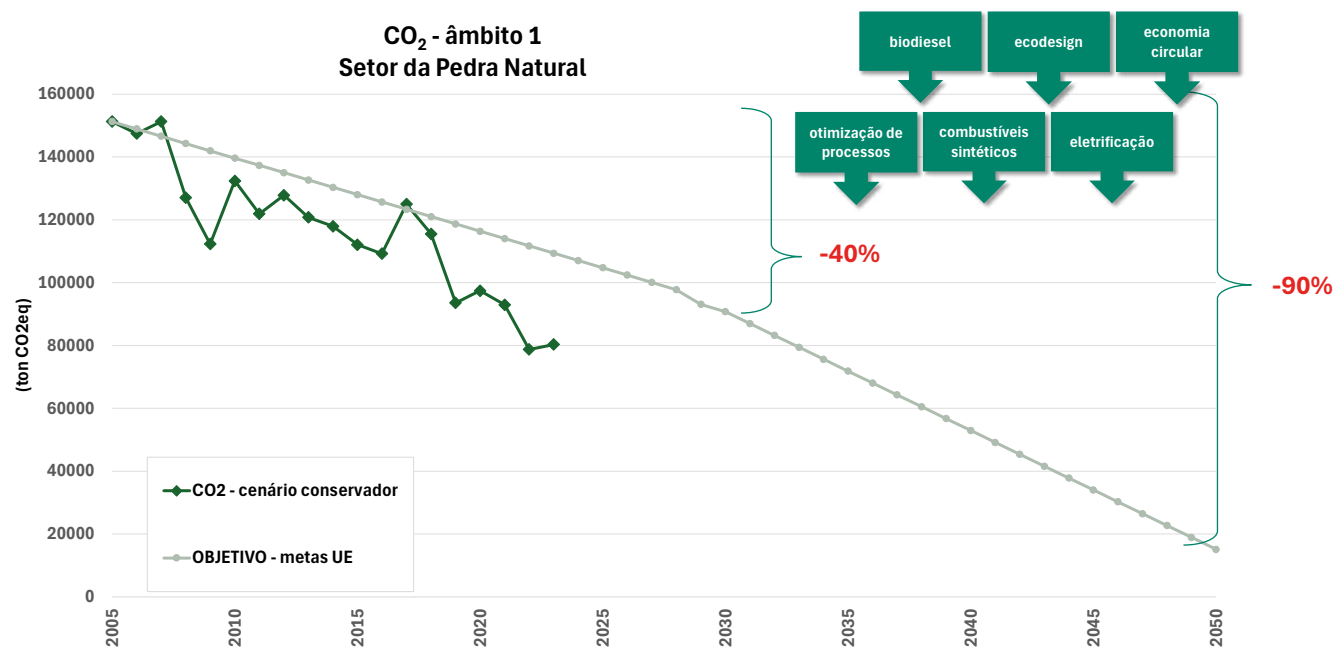
Tecnologias móveis de remoção e transporte (veículos)
 Tecnologias de corte e produção

Água Emissões de GEE
 Eletricidade Combustíveis fósseis

Evolução das emissões de CO₂ – âmbito 1 e seus desafios

Apesar de o setor da Pedra Natural não ser dos mais relevantes em termos absolutos de emissões de CO₂ em Portugal, a figura evidencia o esforço significativo que será necessário para atingir a neutralidade carbónica até 2050. 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 biocombustíveis e hidrogénio, a eletrificação dos equipamentos, a integração de fontes de energia renovável, e a intensificação de práticas de economia circular, como a reutilização de resíduos e a recirculação de água. 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.



► Evolução das emissões de CO₂ no setor da Pedra Natural de 2005 a 2024 e indicação das necessidades de descarbonização face às exigências europeias para 2050 (M. Almeida, P. Frade, 2024).





03.

Principais tecnologias de descarbonização para o setor





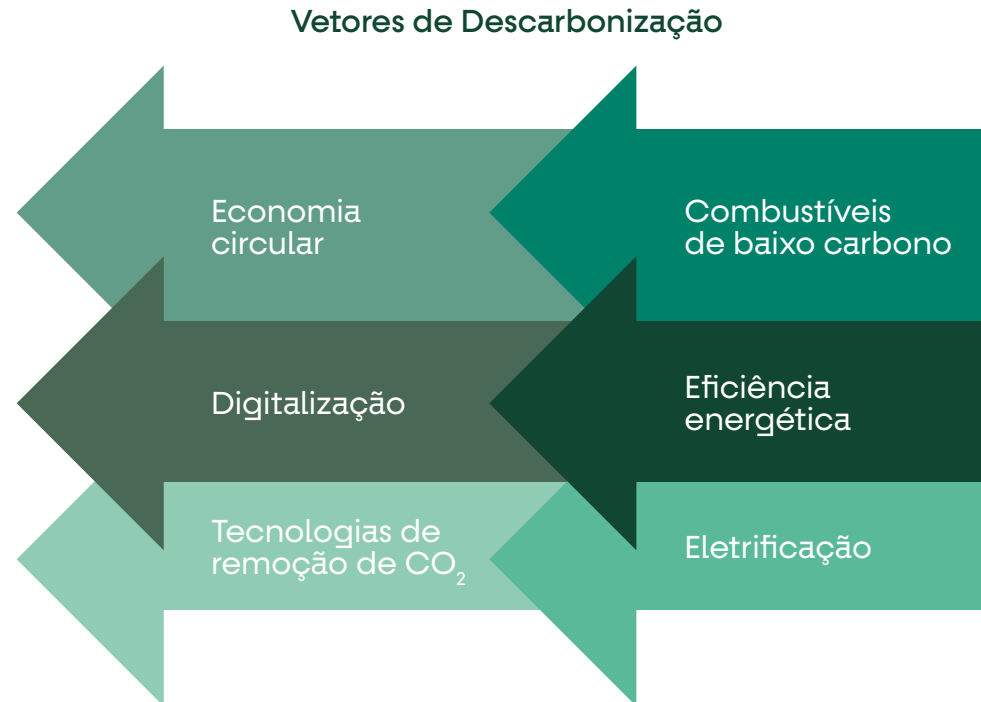
A redução das emissões de gases com efeito de estufa (GEE) no setor da Pedra Natural requer uma abordagem abrangente, que combine diversas estratégias e tecnologias.

As emissões resultam principalmente do **uso de combustíveis fósseis** e de **eletricidade não renovável**.

Um dos maiores entraves à descarbonização do setor é o **elevado custo associado à adoção de tecnologias mais limpas**. Apesar dos apoios e incentivos existentes, o elevado investimento e o longo prazo de retorno comprometem a competitividade, sobretudo, de pequenas e médias empresas.

Obstáculos adicionais à descarbonização incluem: **escassez de combustíveis de baixo carbono**, como o biodiesel e o HVO, **disponibilidade limitada de energia renovável**, e **falta de técnicos qualificados**.

A crescente pressão para reduzir as emissões de GEE está a fomentar progressos no setor, sendo essencial a **cooperação entre empresas, entidades governamentais e centros de investigação**, para encontrar soluções eficazes e sustentáveis.



Eficiência energética







A eficiência energética é um pilar essencial da sustentabilidade, o seu principal objetivo é reduzir o consumo de energia sem comprometer o conforto, a qualidade ou a funcionalidade. A monitorização do consumo energético é essencial para diminuir custos, assegurar conformidade legal e apoiar a descarbonização.

No setor da extração e transformação da Pedra Natural, a eficiência energética assume particular importância. A adoção de um Sistema de Gestão de Consumos e Eficiência Energética (SGEE), com base na norma ISO 50001 ou em modelos adaptados, permite uma gestão mais eficaz da energia, através da identificação de desperdícios, definição de metas de poupança e implementação de melhorias contínuas. A adoção de sistemas de monitorização de energia é um requisito fundamental para a certificação ISO 50001 que estabelece padrões internacionais para estes sistemas com diversos benefícios, entre os quais se destacam:

- Identificação de consumos excessivos e usos ineficientes fora dos horários produtivos, permitindo a correção e diminuição das faturas energéticas.

- Redução de penalizações e reforço da reputação da empresa.
- Recolha de dados fiáveis, para identificação de equipamentos ineficientes e planeamento de intervenções para os modernizar.
- Configuração de alertas para desvios de consumo, antecipando falhas e evitando paragens.
- Análise de custos energéticos por setores ou linhas de produção, apoiando decisões estratégicas.
- Poupança energética que se traduz numa menor pegada de carbono, contribuindo para a sustentabilidade.

Benefícios da implementação de práticas de monitorização e gestão de energia

 <p>Redução de custos</p>	 <p>Maior eficiência operacional</p>	 <p>Gestão e planeamento financeiro</p>
 <p>Conformidade legal e normativa</p>	 <p>Alarmes de manutenção preventiva</p>	 <p>Responsabilidade ambiental</p>

O ciclo da eficiência energética é um processo contínuo composto por quatro fases principais:

1. Diagnóstico e Auditoria Energética – Análise detalhada do consumo atual, identificação de desperdícios e oportunidades de melhoria através de medições e avaliações técnicas.

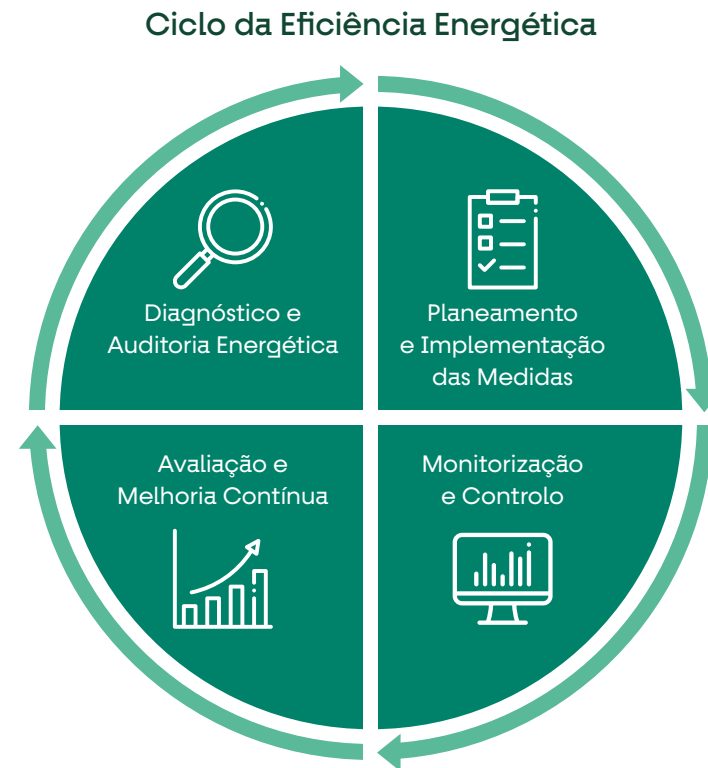
2. Planejamento e Implementação – Definição e execução de estratégias com base no diagnóstico, como substituição de equipamentos e automação de processos.

3. Monitorização e Controlo – Acompanhamento contínuo do consumo energético para verificar a eficácia das medidas implementadas, com apoio de sistemas de monitorização.

4. Avaliação e Melhoria Contínua – Análise dos resultados para identificar novas melhorias e reinício do ciclo, garantindo a eficiência ao longo do tempo.

Os sistemas de monitorização energética tornaram-se essenciais para organizações que visam eficiência, redução de custos e sustentabilidade. Ao fornecerem dados em tempo real, permitem identificar ineficiências, aplicar melhorias e planejar investimentos. Estes sistemas ajudam também no cumprimento de normas ambientais e reforçam a competitividade. A integração de tecnologias como IoT, inteligência artificial e automação está a transformar a gestão de energia, tornando a eficiência energética mensurável. O ciclo contínuo de diagnóstico, planeamento, monitorização e avaliação torna

a monitorização uma necessidade estratégica num mercado cada vez mais exigente.



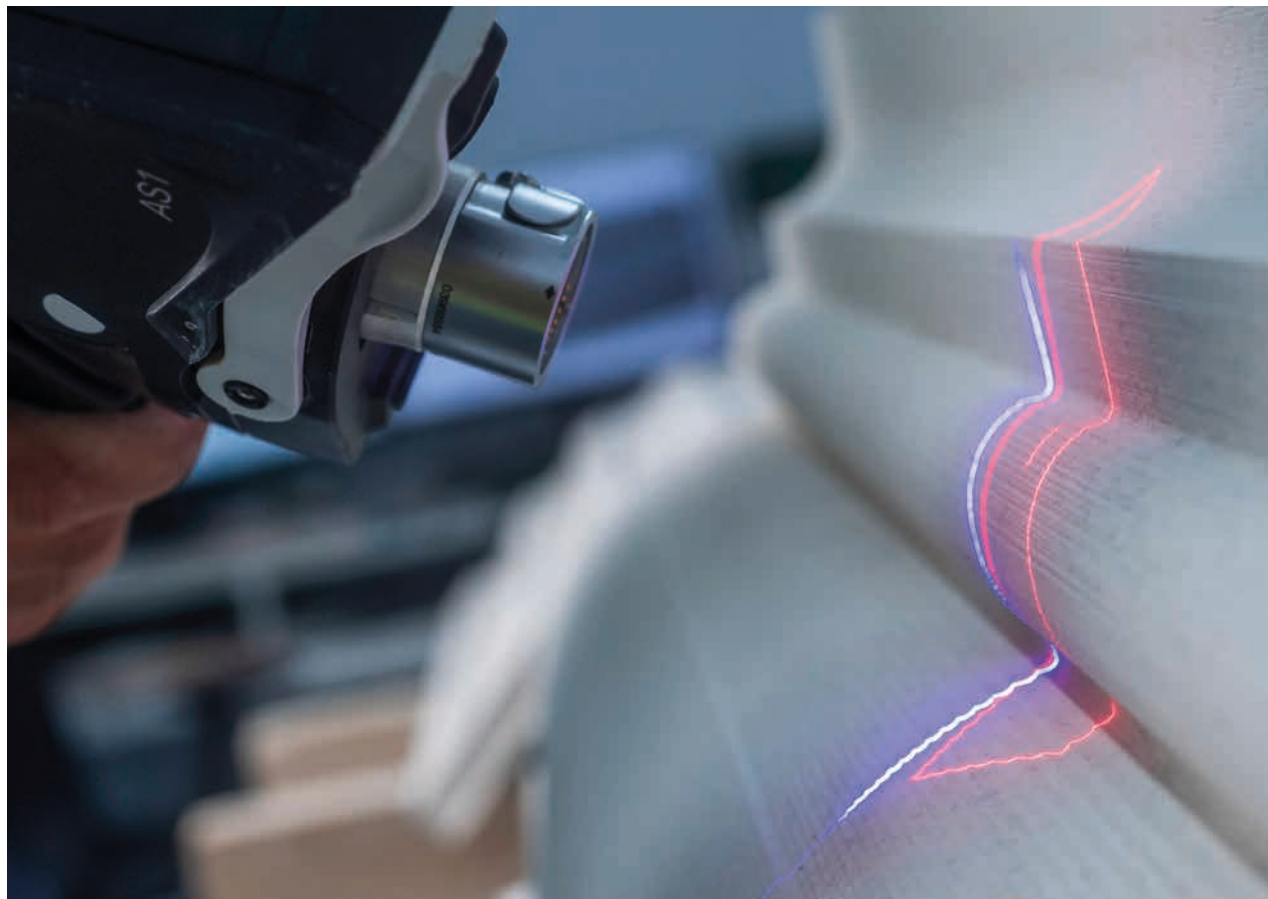
Digitalização

A digitalização centrada na indústria e nas pessoas é um pilar da **Transição Digital (TD)**.

A adoção de tecnologias digitais permite às empresas ganhar competitividade, inovar e expandir mercados. No entanto, exige qualificação de recursos humanos, infraestruturas de conectividade seguras e acessíveis, e apoio à inovação.

Na indústria são já disponibilizadas inúmeras soluções com tecnologias avançadas para modernizar o setor e contribuir para a neutralidade carbónica, desde **formação digital**, **ecossistemas de inovação** a **serviços test-before-invest**, facilitando decisões tecnológicas mais seguras e informadas.

O futuro digital do setor centra-se em **investigação**, **inovação** e **adoção de novas tecnologias**, com apoio de programas como os *European Digital Innovation Hubs*, na **sensibilização das lideranças das PME para a transformação digital**, na **cooperação empresarial e institucional**, no **desenvolvimento de infraestruturas digitais com parcerias internacionais**, e na **monitorização contínua das medidas implementadas**.



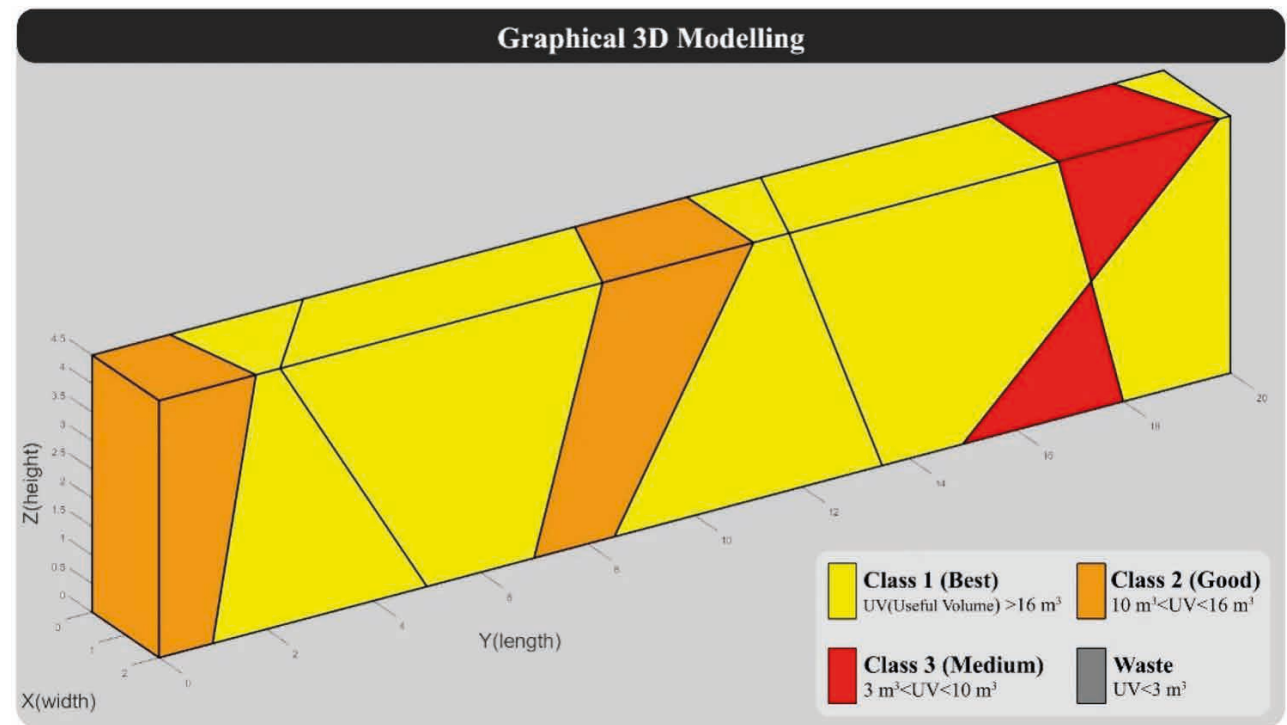
A aceleração digital sustentável no setor da Pedra Natural requer uma abordagem estruturada e alinhada com o Roteiro para a Transição Digital e Energética. As principais prioridades e caminhos incluem:

1. **Diagnóstico de Maturidade Digital** - Avaliação certificada e contínua, com recolha de dados fiáveis para apoiar decisões estratégicas e monitorizar progressos.
2. **Sensorização e IoT** - Monitorização em tempo real em pedreiras e unidades industriais com sensores permitindo, manutenção preditiva, redução de impactos ambientais e garantia de conformidade legal.
3. **Digitalização Avançada e Interoperabilidade** - Uso de tecnologias como *scanners 3D* e gémeos digitais (*Digital Twins*) para otimização de cortes, redução de desperdícios e integrar fábricas inteligentes.
4. **Capacitação de Recursos Humanos** - Formação contínua e requalificação em digitalização, sustentabilidade e tecnologias emergentes, desenvolvidos em parceria com centros de ensino e I&D.
5. **Eletrificação de Equipamentos** - Substituição progressiva de maquinaria a gasóleo por versões elétricas, híbridas ou a hidrogénio, com infraestruturas de carregamento e sistemas de gestão energética.
6. **Energias Renováveis** - Instalação de sistemas de energia solar (fotovoltaica e térmica) para auto-

consumo, visando reduzir emissões e reforçar a resiliência energética.

7. **Economia Circular** - Valorização de resíduos (p. ex. lamas e fragmentos), através de simbioses industriais com setores como o cimento e a cerâmica.

8. **Inteligência Artificial e Otimização de Processos** - Uso de IA e *machine learning* para prever falhas, simular operações e otimizar a produção, contribuindo para operações mais eficientes e sustentáveis.



► Modelo 3D de um bloco de pedra, não considerando cortes verticais (Fonte: M. H. Jalalian 2023)

Eletrificação

A descarbonização do setor da Pedra Natural passa, sobretudo, pela substituição de combustíveis fósseis por energias renováveis, com destaque para a eletrificação do transporte de cargas nas pedreiras e entre estas e os locais de transformação. 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 da movimentação de cargas, é igualmente relevante 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.



► Máquina de fio telescópica extensível.

Eletrificação Transporte e maquinaria pesada

Existem várias soluções tecnológicas com diferentes graus de maturidade e aplicação:

- **Sistemas de catenária** - já amplamente utilizados no transporte ferroviário, permitem alimentar veículos pesados com grandes quantidades de energia. Contudo, estão limitados a rotas com infraestrutura elétrica.
- **Baterias** - cada vez mais comuns graças ao avanço tecnológico, são usadas em veículos industriais que requerem elevado fornecimento de energia e infraestruturas próprias de carregamento. Há também soluções como baterias removíveis e recarregamento em movimento.
- **Sistemas combinados catenária/bateria** - permitem alternar entre fontes de energia, ampliando a autonomia dos veículos para além das rotas com catenárias, podendo até recarregar baterias durante o movimento.
- **Sistemas híbridos gasóleo/elétricos** - usados onde a eletrificação total ainda não é viável, combinam motores a gasóleo e elétricos, mantendo a flexibilidade de operação.



▶ Protótipo de escavadora EX01 de alimentação dupla e alimentação por cabo (Fonte: Volvo CE).



Eletrificação Equipamentos

A eletrificação de equipamentos auxiliares nas pedreiras, como bombas de água e compressores de ar, é também relevante para a redução das emissões de gases com efeito de estufa, apesar do seu menor consumo face à movimentação de cargas.

- **Bombas de água elétricas** - Substituem as moto-bombas a gasóleo, oferecendo vantagens como menor custo operacional, ausência de emissões e menor risco ambiental devido à eliminação de derrames de combustível. A sua principal limitação é a menor portabilidade, embora o custo de instalação elétrica em locais remotos esteja a diminuir.
- **Compressores de ar elétricos** - São essenciais para várias operações (perfuração, desmonte, etc.) e permitem reduzir significativamente as emissões de CO₂ e outros poluentes. Além dos benefícios ambientais, destacam-se pela menor manutenção e baixo ruído. Os principais desafios são o acesso limitado à rede elétrica em zonas remotas e o custo inicial mais elevado, que pode ser compensado por poupanças a longo prazo.



► Bomba elétrica (Fonte: Atlas Copco)

A adoção de energias renováveis, como a solar, permite diminuir a dependência de combustíveis fósseis e reduzir as emissões carbônicas. A instalação de **painéis fotovoltaicos** e **coletores solares** possibilita a produção de eletricidade e calor a partir do sol, reduzindo o consumo de energia convencional.

A **cogeração renovável de alta eficiência**, que aproveita simultaneamente eletricidade e calor, permite otimizar o uso da energia e cortar desperdícios.

Energia Solar Fotovoltaica

A energia solar fotovoltaica apresenta vantagens como produção limpa, silenciosa, modular e de fácil instalação, com custos em queda graças à industrialização e inovação tecnológica.

O autoconsumo permite produzir e consumir eletricidade localmente, reduzindo custos e a dependência da rede.

Apesar das vantagens, o fotovoltaico tem limitações: produção apenas durante o dia, menor densidade de potência e eficiência reduzida com o calor.

As Comunidades de Energia Renovável (CER) podem assumir um papel importante na estratégia de descarbonização do setor da Pedra Natural, ao reunir as empresas e os habitantes locais para produzir, partilhar e consumir energia limpa, promovendo uma gestão energética mais próxima, eficiente e sustentável.

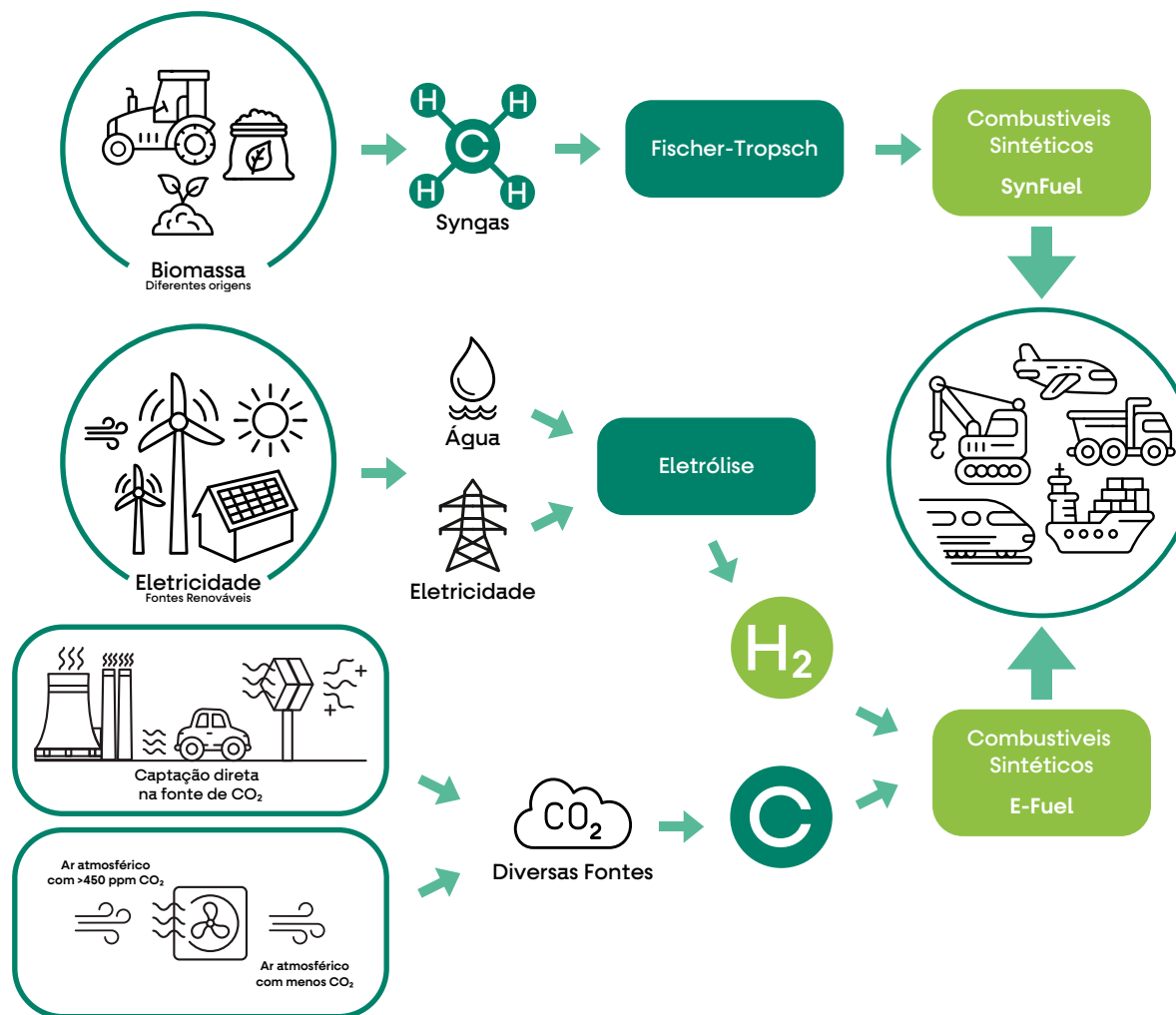


Combustíveis de baixo carbono

Alinhar o setor da Pedra Natural com os objetivos de descarbonização europeus e nacionais exige a substituição progressiva do gasóleo por alternativas mais sustentáveis, como os biocombustíveis e os combustíveis sintéticos, que permitem reduzir as emissões sem comprometer a eficiência operacional, cumprindo os critérios de sustentabilidade previstos na diretiva RED (*Renewable Energy Directive*).

- **Biocombustíveis** - Produzidos a partir de biomassa, são fundamentais para descarbonizar setores que dependem de motores a combustíveis fósseis. Entre os mais usados como substitutos do gasóleo estão o **biodiesel** (FAME) e o **HVO** (óleo vegetal hidrotratado). O biodiesel tem um processo de produção mais simples e económico, enquanto o HVO, embora mais caro, tem melhor desempenho técnico e elevada compatibilidade com os motores existentes. Ambos podem reduzir as emissões de gases com efeito de estufa até 90%.
- **Combustíveis sintéticos** - Podem ser obtidos através de processos como a síntese Fischer-Tropsch, ou a partir do hidrogénio (obtido por eletrólise) e do dióxido de carbono capturado, proveniente de fontes industriais ou da atmosfera. Estes combustíveis, também chamados *synfuels* ou *e-fuels* (quando toda a energia e carbono usado é de origem renovável), replicam as propriedades dos combustíveis fósseis tradicionais, como gasóleo ou gasolina, garantindo um desempenho técnico equivalente, sem necessidade de alterar os equipamentos atuais. Embora promissores, mas ainda estão numa fase tecnológica inicial, com custos elevados e produção limitada.

Processo de produção de combustíveis sintéticos



Os combustíveis sintéticos, produzidos a partir de hidrogénio verde e de dióxido de carbono capturado, surgem como uma alternativa aos combustíveis fósseis em setores de difícil eletrificação, e sem necessidade de alterações profundas nas infraestruturas existentes. No centro deste processo está o hidrogénio verde, matéria-prima essencial, e o amoníaco verde, que pode servir como combustível direto ou como solução de armazenamento e transporte de hidrogénio.

- **Hidrogénio verde** - Produzido a partir da eletrólise da água e utilizando fontes de energia renováveis, pode 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, existem limitações associadas à sua produção, custo, segurança e infraestruturas. Ultrapassados estes desafios, pode tornar-se uma solução para acelerar a transição energética do setor até 2050.
- **Amoníaco verde** - Produzido a partir do hidrogénio obtido por eletrólise da água usando energia renovável, e do azoto do ar, é uma alternativa promissora para armazenar e transportar hidrogénio de forma mais eficiente, graças à sua maior densidade energética volumétrica e à infraestruturas já existente. Utilizado amplamente na produção de fertilizantes, o amoníaco também pode funcionar como combustível com emissões zero de CO₂, embora possa gerar NO_x durante a combustão, o que exige desenvolvimento de catalisadores mais eficazes.



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. 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. 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.

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.

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, onde se destaca:

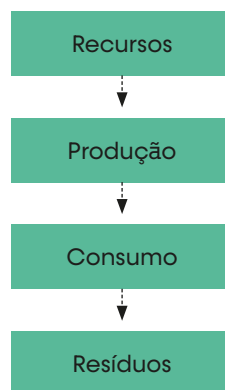
- **Extensão do ciclo de vida** - Visa prolongar a utilidade dos produtos de pedra e valorizar resíduos através da sua reconversão em novos materiais ou produtos.
- **Pensamento de ciclo de vida** - Valoriza o uso eficiente de recursos em todas as fases do produto, da extração ao fim de vida, promovendo decisões mais sustentáveis.

- **Ecodesign** – Integra considerações ambientais no design do produto, influenciando até 80% dos seus impactes ambientais. Desde a conceção, procura otimizar o desempenho ambiental ao longo de todo o ciclo de vida, promovendo o uso eficiente de recursos.
- **Gestão de resíduos** - Promove a reutilização e valorização de materiais anteriormente considerados subprodutos ou desperdícios, como lamas, aparas e pó de pedra, em novos ciclos produtivos. Desta forma, o setor reduz significativamente a sua pegada ambiental, diminui a necessidade de extração de matérias-primas virgens e contribui

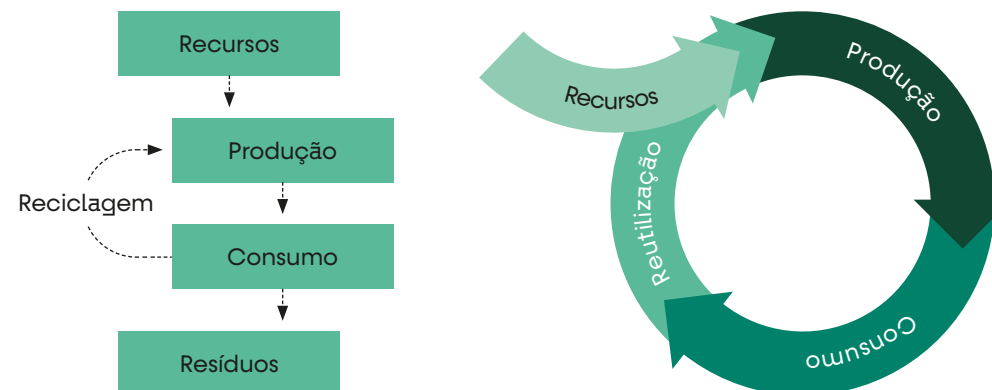
para a conservação dos recursos naturais. Esta abordagem circular permite não só minimizar os impactes negativos associados à deposição inadequada de resíduos, como também potenciar novas oportunidades de mercado, através do desenvolvimento de produtos inovadores com valor acrescentado.

- **Simbioses industriais** – Colaboração com outros setores industriais para tratar o que inicialmente seria considerado como resíduo num novo produto ou matéria-prima (ex. utilização de lamas de corte de pedra como aditivo na produção de cimento).

Economia linear



Economia circular



▶ Comparação entre a abordagem da economia circular e a da economia linear.

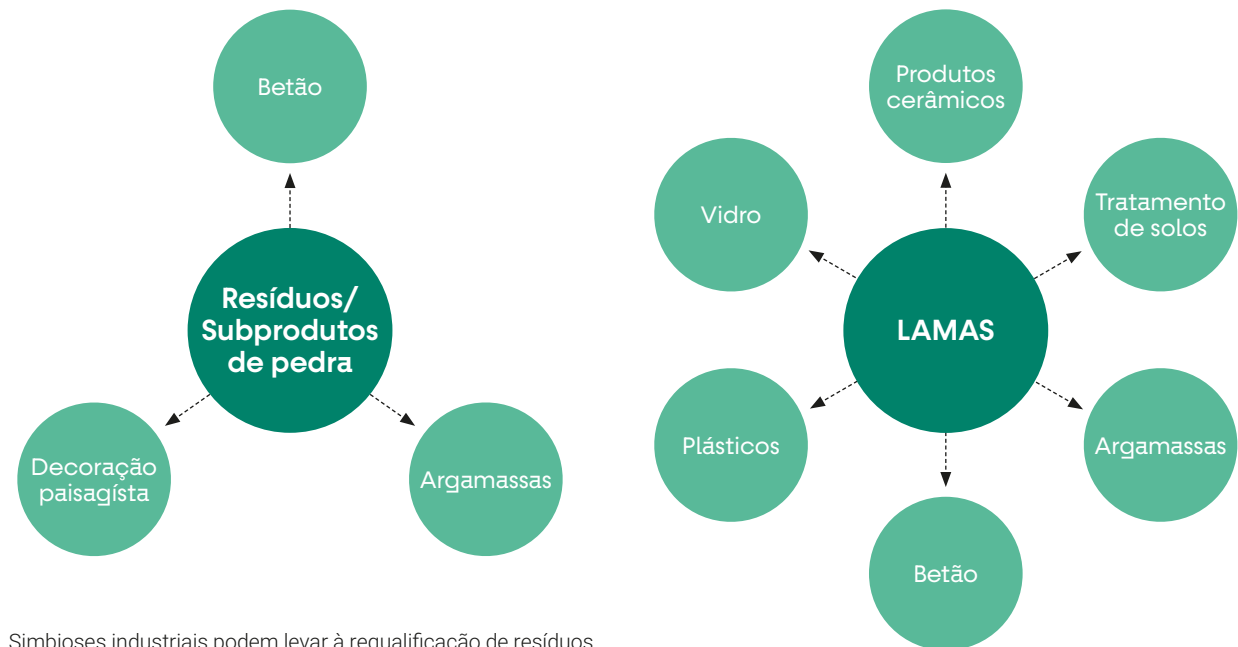
Economia circular

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 filtração, 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 impactos ambientais e gerar valor económico a partir do que antes era considerado desperdício.

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.

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.



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

Principais tecnologias de descarbonização para o setor

Melhoria e eficiência hídrica - A adoção das melhores tecnologias disponíveis para o tratamento e reutilização da água de processo na exploração de pedra natural permite reduzir o consumo de água potável, minimizar efluentes contaminados e otimizar a gestão hídrica. Entre as soluções mais eficazes destacam-se os sistemas de recirculação em circuito fechado, a floculação e decantação avançada de lamas, bem como tecnologias de filtragem por membranas e ultrafiltração. A adoção destas tecnologias 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.

Qualidade do ar e ruído – Na atividade de extração, o setor procede à minimização de dispersão de poeiras, destacando-se a rega por aspersão de água nos acessos à exploração e sempre que possível é mantida e reforçada uma cortina arbórea no perímetro da exploração. 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 impacto em termos de ruído. Na transformação da pedra a utilização de sistemas de despoeiramento permite a captação de poeiras, as quais poderão posteriormente ser reutilizadas noutro setor industrial ou utilizado na recuperação paisagística da exploração.



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. Alinhada com os princípios da economia circular, pode incluir a reutilização de resíduos do próprio processo industrial. Esta prática cumpre exigências legais, valoriza ambiental e socialmente o território e reforça o compromisso do setor com a sustentabilidade.

- ▶ Integração de práticas economia circular no setor da Pedra Natural: recuperação paisagística, gestão eficiente de resíduos e otimização do uso da água (Fonte: J. Nunes).

Tecnologias de remoção de CO₂

Apesar da necessidade urgente de reduzir as emissões de CO₂, algumas atividades geram emissões diretas inevitáveis, exigindo soluções tecnológicas eficazes para mitigar o seu impacto climático.

As **tecnologias de captura, utilização e armazenamento de carbono (CCUS)** e de **remoção direta de carbono (CDR)**, assumem um papel fundamental na transição para uma economia de baixo carbono.

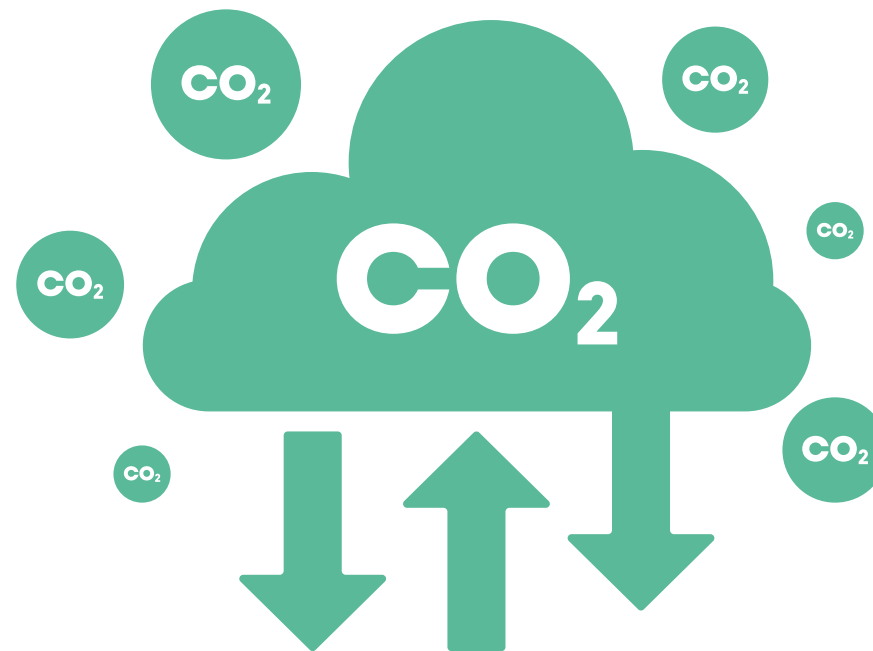
De entre as CDR são de especial interesse a carbonatação mineral e a mineralização estimulada.

Carbonatação mineral - Baseia-se num processo geoquímico que transforma o CO₂ em carbonatos sólidos estáveis, por reação com rochas ricas em magnésio e cálcio. Pode ocorrer *in situ*, por injeção de CO₂ em formações geológicas como basaltos, ou *ex situ*, em instalações industriais, onde as rochas são trituradas e reagem com o CO₂ sob condições controladas, sendo esta abordagem mais indicada para rochas de baixa porosidade e com potencial para aplicação em larga escala.

Meteorização estimulada - Método de CDR baseado na aceleração das reações naturais entre minerais silicatados e o CO₂ atmosférico ou dissolvido em água. Pode ser aplicada em solos agrícolas, ou em ambientes marinhos e costeiros, através da dispersão de minerais pulverizados como a olivina. Além de sequestrar CO₂, esta prática melhora a qualidade dos solos, aumenta o pH e promove a fertilização natural.

A carbonatação mineral *ex situ* e a meteorização estimulada podem ser aplicadas na valorização de subprodutos gerados durante a extração e transformação de rochas básicas e ultrabásicas.

Se tratados adequadamente, estes resíduos podem sequestrar CO₂ de forma permanente, promovendo a redução de emissões e a economia circular na indústria extrativa, e podendo até compensar as emissões de outros setores.





GRANI ROC

KUKA



04.

Evolução prevista para o setor

ROAD TO 2050
ROTEIRO PARA A DESCARBONIZAÇÃO
DO SETOR DA PEDRA NATURAL



Evolução prevista para o setor

As projeções para o setor da Pedra Natural em Portugal indicam uma trajetória de crescimento moderado da produção, alinhando com as projeções do PIB, acompanhando a recuperação económica e a procura internacional por materiais de construção, revestimentos e outros produtos técnicos e utilitários. Este dinamismo industrial implicará um aumento gradual do consumo energético global do setor, ainda fortemente dependente do gásóleo na etapa da extração, mas que tenderá a diversificar-se com a introdução de vetores mais limpos como o biodiesel, HVO, biometano e hidrogénio verde.

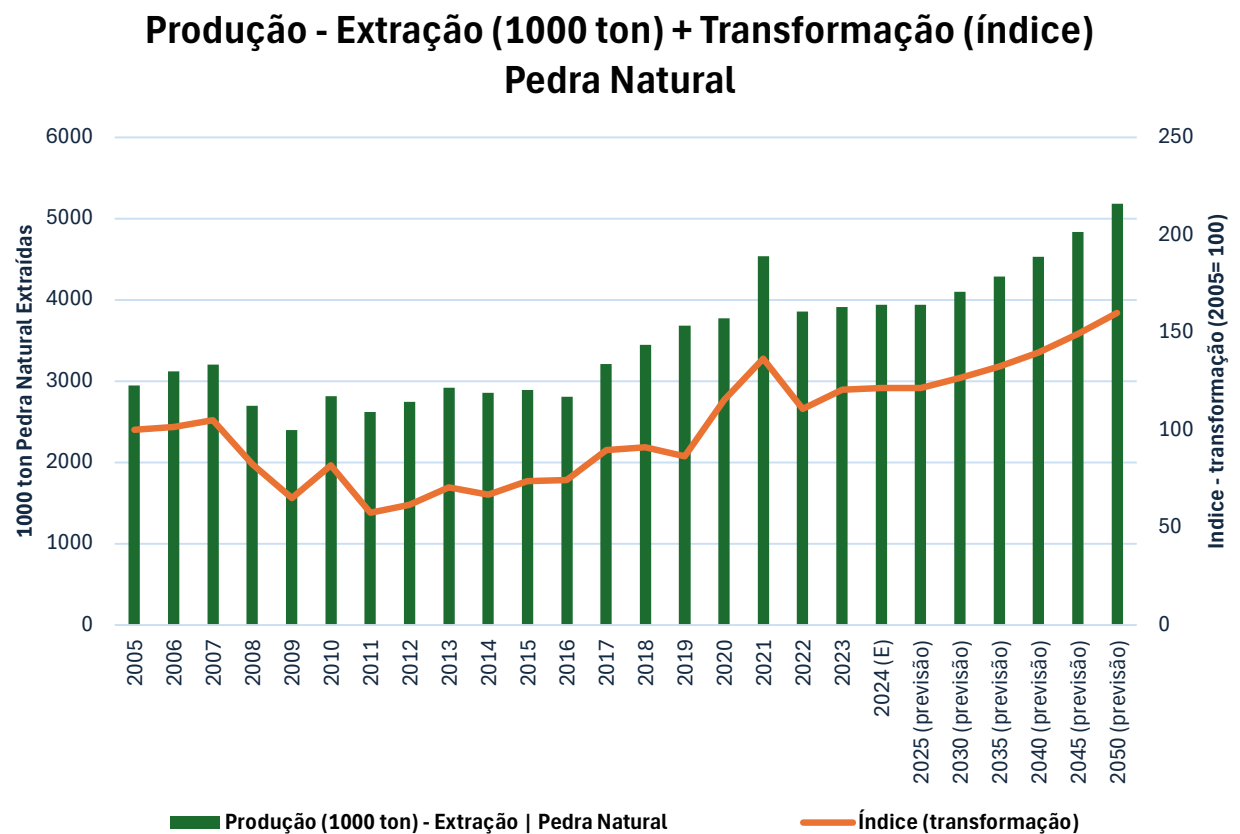
No que respeita à eletricidade, maioritariamente na etapa da transformação, antecipa-se um crescimento progressivo do consumo, associado aos processos na transformação da pedra. A adoção de eletricidade de origem renovável será determinante para reduzir a intensidade carbónica e alinhar o setor com as exigências regulatórias e de mercado em matéria de sustentabilidade. Em termos de emissões de gases com efeito de estufa (GEE), o grande desafio do setor passa por assegurar que o aumento da produção não se traduz automaticamente em maiores emissões totais. As projeções indicam uma redução progressiva da intensidade carbónica por tonelada de produto, mas o resultado final dependerá fortemente da rapidez com que forem adotadas novas tecnologias, da expansão do uso de energias renováveis e combustíveis limpos e da eficácia das políticas de descarbonização aplicadas a toda a cadeia de valor.



Projeções do setor - 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. 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 novas 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.



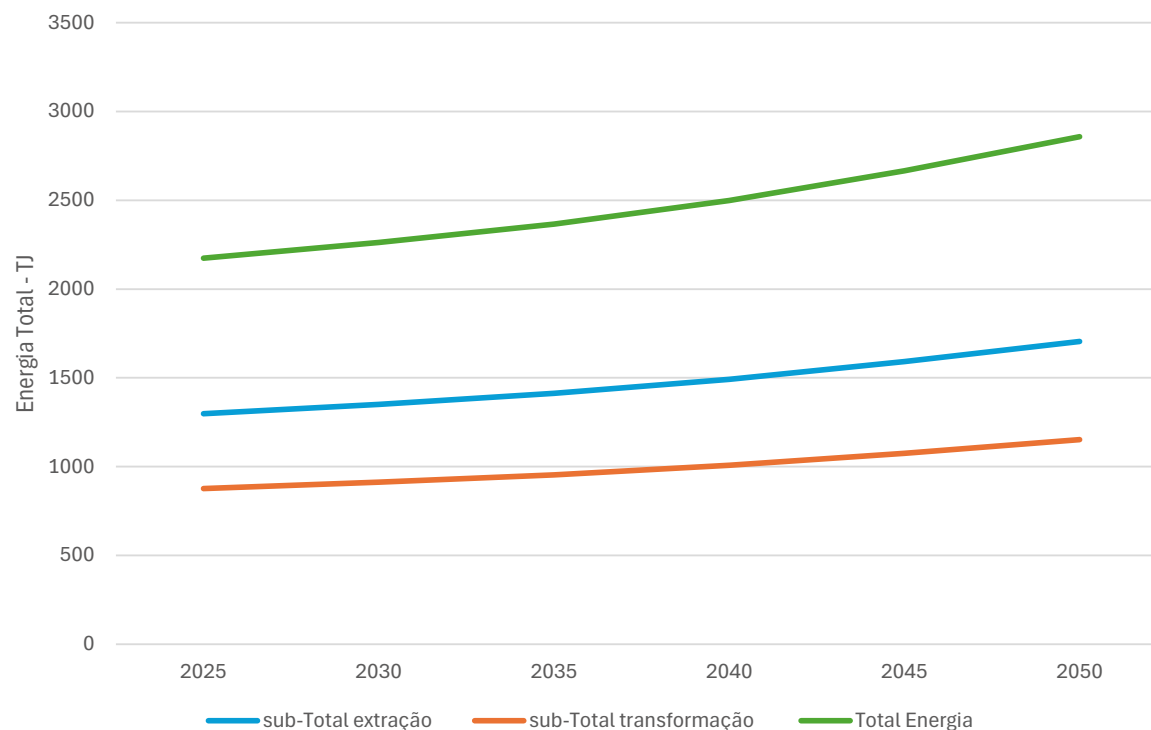
- ▶ Produção – extração (1000 toneladas) e índice produção de pedra transformada (2005=100) – previsões (Fonte: CTCV, Assimagra, PNEC2030, RNC2050)

Projeções do setor – consumo energético

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.

Energia Global na Indústria da Pedra Natural - previsões

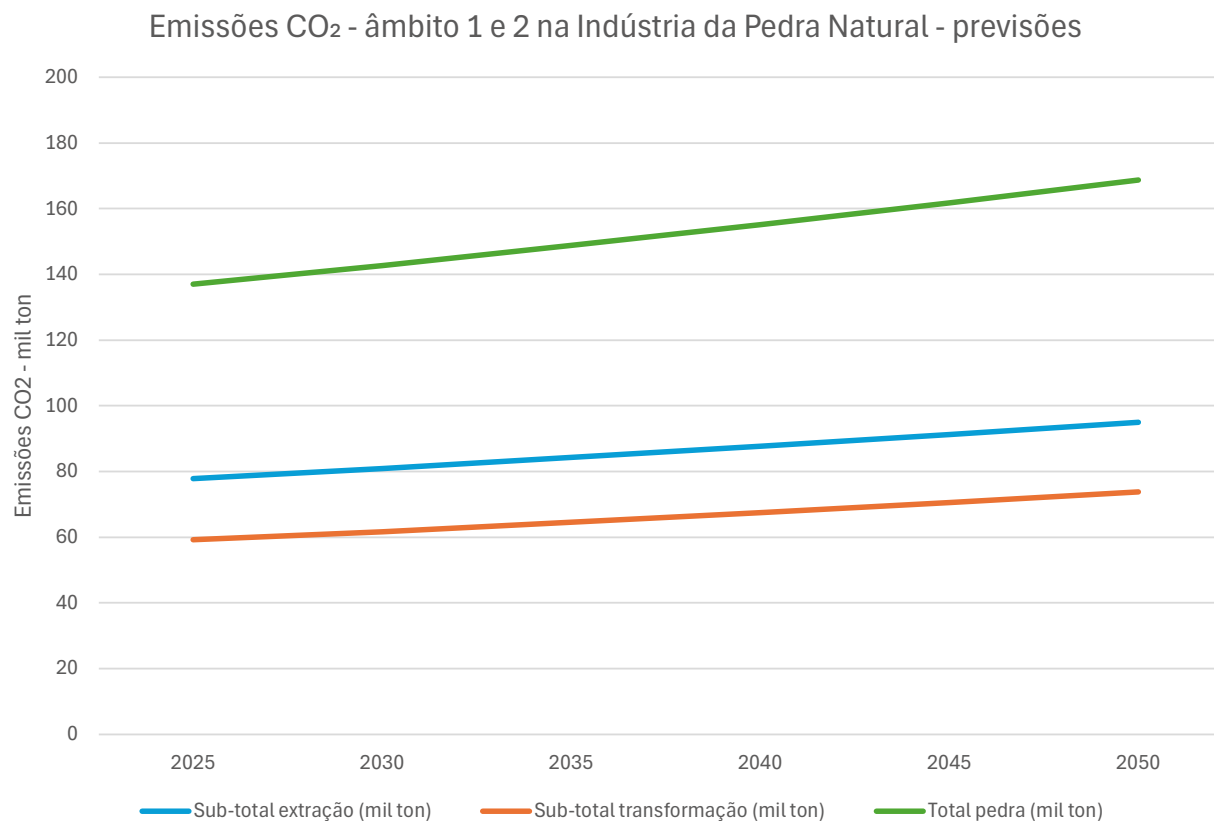


► Projeções de 2025 a 2050 - Energia total (eletricidade e outros combustíveis) (Fonte: CTCV, Assimagra, PNEC2030, RNC2050)

Projeções do setor – emissões de CO₂

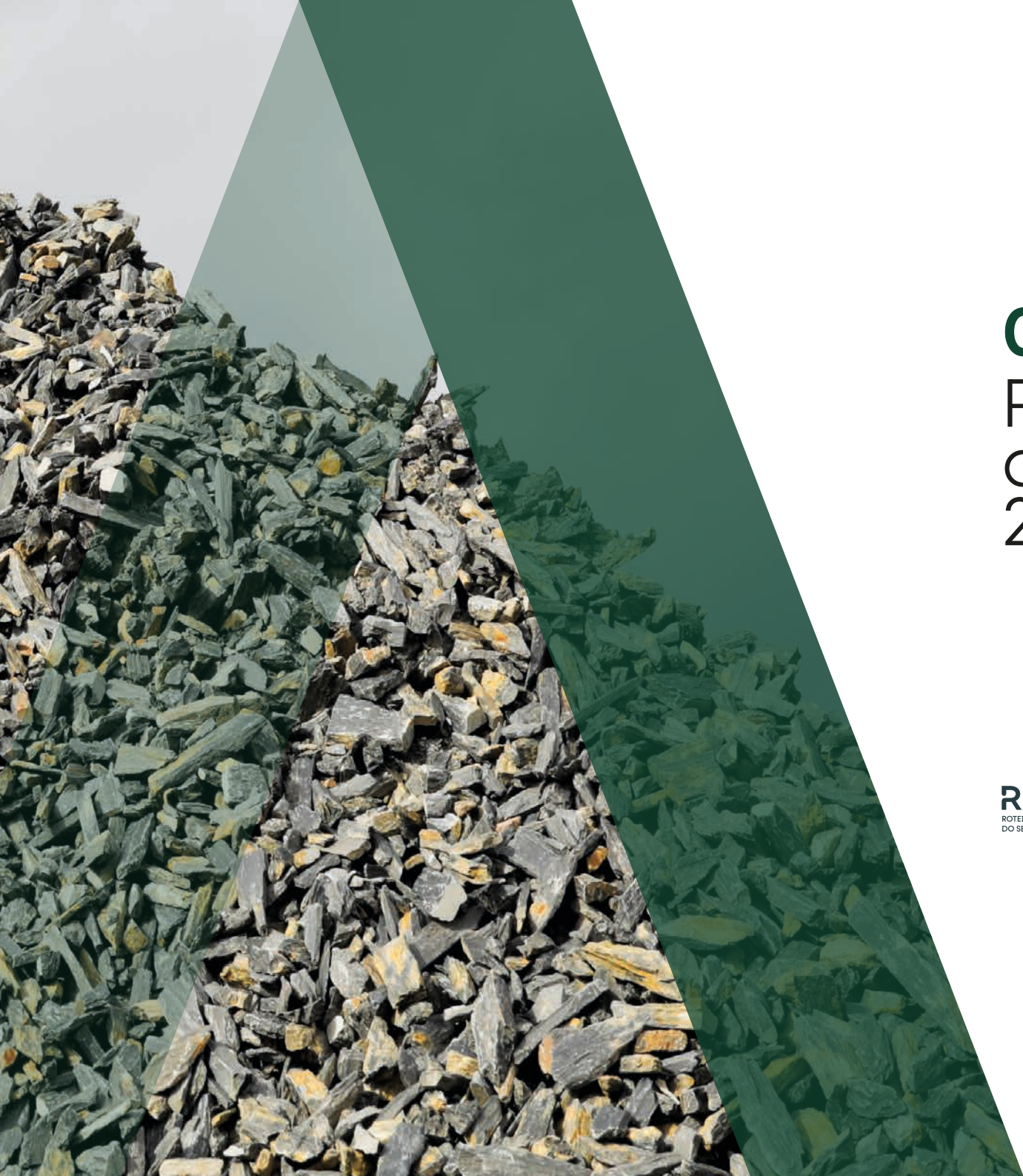
Entre 2025 e 2050, num cenário *Business as Usual*, a trajetória das emissões de CO₂ do setor da Pedra Natural (cenário maximizante e incluindo o âmbito 1 e 2) acompanha, em grande medida, a evolução do consumo energético. Nos primeiros anos, observa-se uma estabilização ou ligeira subida das emissões 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 CO₂.

A análise das previsões de emissões de CO₂ 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.



- Projeções de 2025 a 2050 – Emissões totais (âmbito 1 e âmbito 2) (Fonte: CTCV, Assimagra)





05.

Potencial de descarbonização 2025 a 2050

Potencial de descarbonização - Extração da Pedra Natural

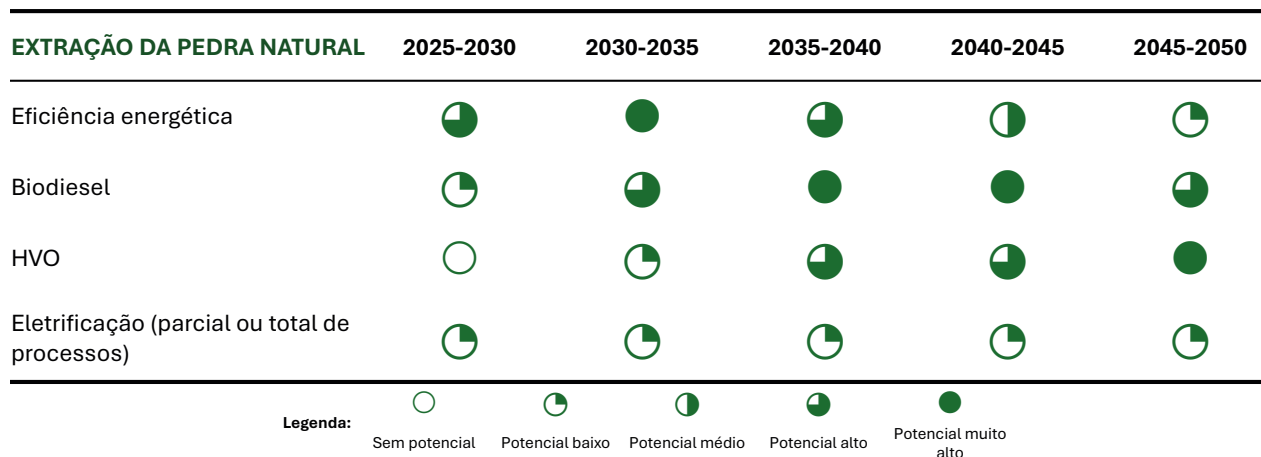
Na atividade de extração da pedra natural a eficiência energética dos equipamentos assume um papel crucial na redução do consumo energético e, consequentemente, das emissões de GEE associadas. Destacam-se, em particular, os compressores, equipamentos responsáveis por consumos elevados (superior a 1/4 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 gasóleo 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 gasóleo (como compressores e equipamentos de transporte de blocos dentro das pedreiras) por soluções elétricas.



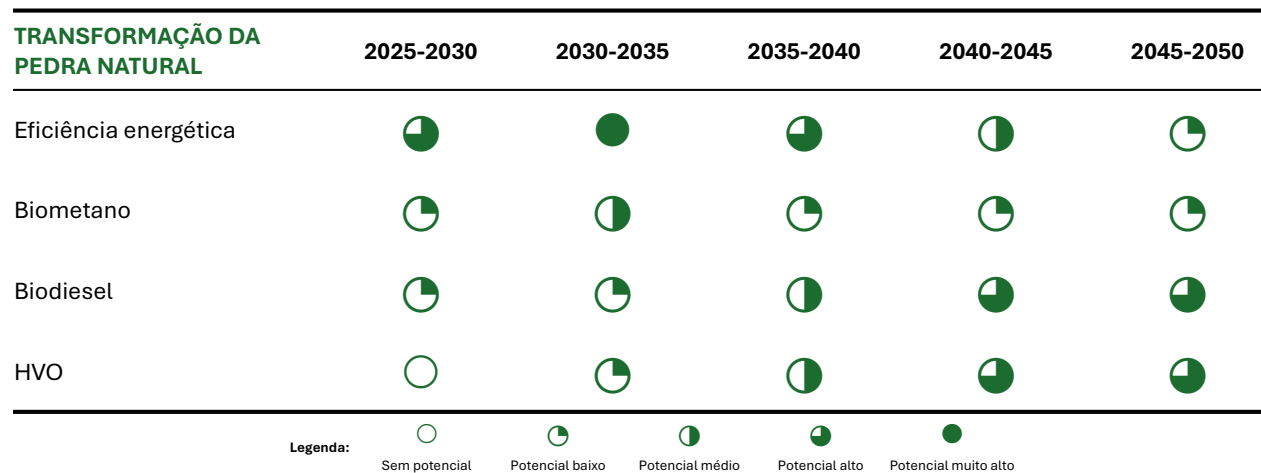
Potencial de descarbonização - Transformação da Pedra Natural

A eficiência energética desempenha um papel fundamental também na descarbonização das atividades de transformação da 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.

O biometano surge como alternativa ao propano ou gás natural (utilizados num processo específico de acabamento: o flamejado da pedra). Dado o peso reduzido deste processo face ao conjunto das operações do subsector, o potencial de redução de emissões associado a utilização de biometano é globalmente baixo. No entanto, entre 2030 e 2035, com a crescente penetração deste vetor no mercado, estima-se que o potencial seja ligeiramente superior.

No âmbito da substituição de vetores energéticos, e tal como na extração, o biodiesel e o HVO surgem como alternativas ao gasóleo. Contudo, neste caso com menor potencial de descarbonização uma vez que a utilização de gasóleo tem menor expressão

nas atividades de transformação, quando comparado com a extração. Ambos 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 da pedra natural.



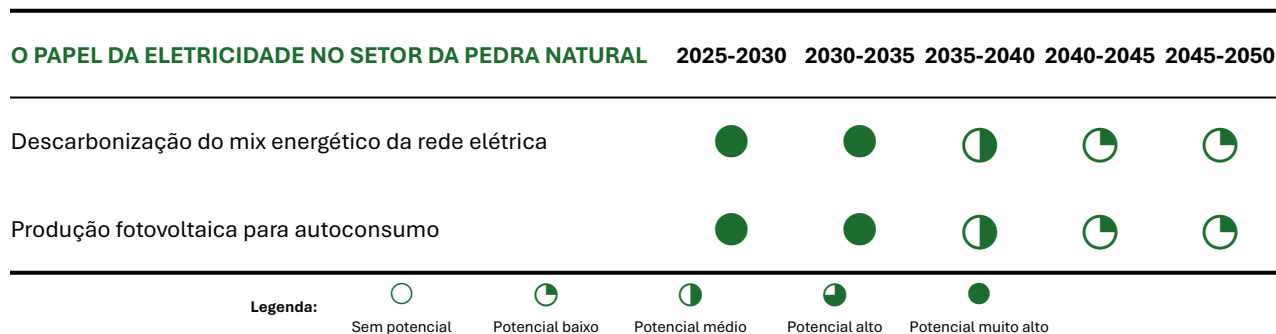
Potencial de descarbonização - Eletrificação do setor da Pedra Natural

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 Plano Nacional de Energia e Clima 2030 e com o Roteiro para a Neutralidade Carbónica 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 torna-se significativamente mais limitado.

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,

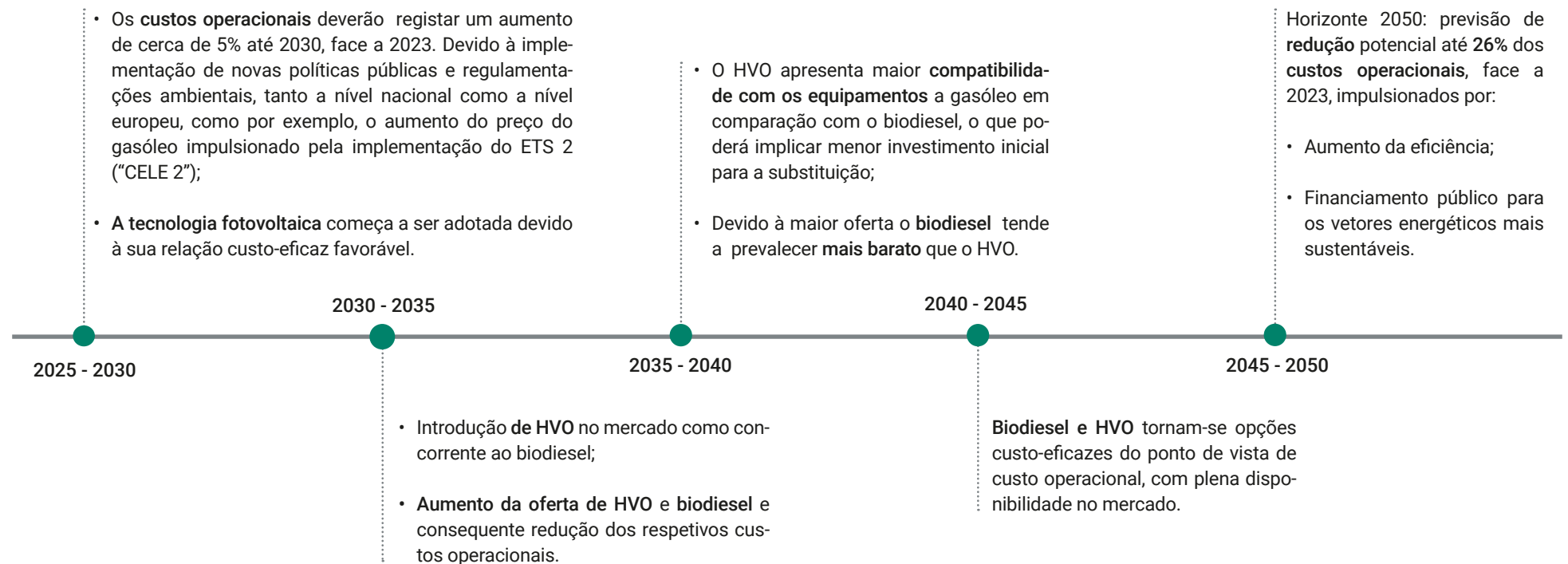
e acelerar a descarbonização da eletricidade utilizada. Sendo uma tecnologia madura, amplamente disponível e de rápida implementação, o seu potencial de aplicação e, consequentemente, de redução de emissões é particularmente elevado no curto prazo (2025-2035). No entanto, este potencial tende a sofrer uma saturação progressiva, à medida que o espaço disponível vai sendo progressivamente menor, resultando num potencial de descarbonização mais reduzido entre 2040 e 2050.



Evolução económica – cenário custo-eficaz

A tecnologia **fotovoltaica** mantém-se custo-eficaz durante todo o período. Alguns equipamentos atuais deverão ser **eletrificados** ou adaptados para versões híbridas. Além disso, prevê-se que, no futuro, surjam novas tecnologias, atualmente com menor maturidade e CAPEX mais elevado, mas com potencial para substituir equipamentos que atualmente apresentam maior dificuldade de eletrificação.

As medidas de **eficiência energética**, deverão ser implementadas ao longo de todo o período, sendo feito o investimento aquando do surgimento de novas tecnologias e acompanhando o ciclo de vida dos equipamentos.







06.

ROADTOZERO Stone Carbon Calculator

ROAD TO 2050
ROTEIRO PARA A DESCARBONIZAÇÃO
DO SETOR DA PEDRA NATURAL



Uma ferramenta de cálculo de CO₂

Foi desenvolvida uma ferramenta de cálculo das emissões de CO₂: ROADTOZERO - STONE CARBON CALCULATOR que, para além de calcular as emissões de CO₂ associadas às operações do setor da Pedra Natural, permite simular diferentes cenários operacionais e tecnológicos tais como: substituição de gasóleo por HVO, integração de painéis solares ou eletrificação de processos, constituindo assim um roteiro personalizado para a descarbonização de cada empresa.



Levantamento de Dados

Recolha de informações detalhadas sobre as atividades e processos, incluindo consumo de energia, transporte, gestão de resíduos e outras fontes de emissões de gases de efeito estufa (GEE).

Identificação de Fontes de Emissão

Análise dos dados recolhidos para identificar as principais fontes de emissões de GEE na operação. Inclui emissões diretas (Âmbito 1) e emissões indiretas associadas à eletricidade e energia compradas (Âmbito 2).

Cálculo das Emissões

Utilizando metodologias reconhecidas internacionalmente, como o *Greenhouse Gas Protocol* e a norma ISO 14064 e ISO 14067, cálculo das emissões de GEE associadas a cada fonte identificada.

Análise e Relatório

Apresentação dos resultados do cálculo de forma clara e compreensível, destacando as áreas de maior impacto e oportunidades de redução de emissões.

Desenvolvimento de Estratégias de Redução

Com base nos resultados da análise, desenvolver e implementar estratégias eficazes para reduzir as emissões de GEE, melhorar a eficiência energética e promover práticas sustentáveis em toda a organização.

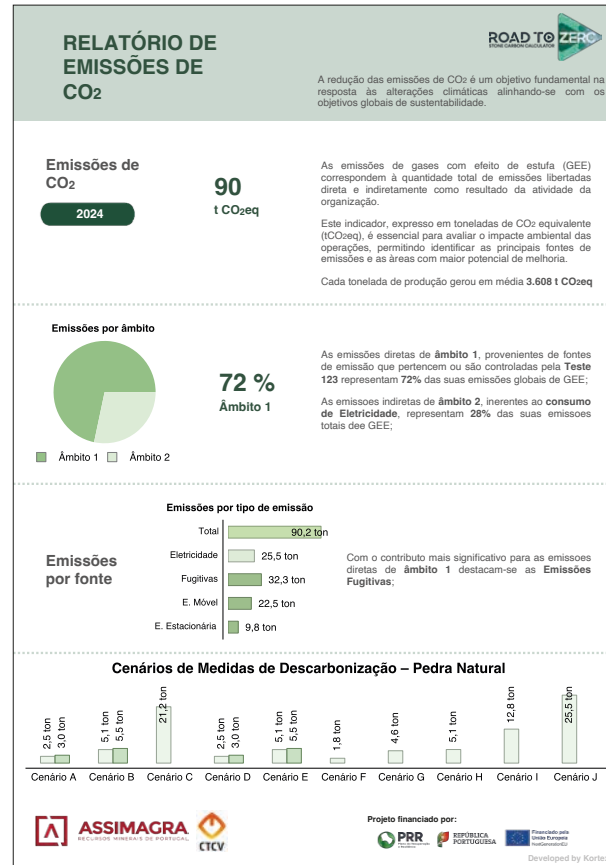
Monitorização e Acompanhamento

Estabelecimento de sistemas de monitorização contínua para acompanhar o progresso ao longo do tempo e ajustar as estratégias conforme necessário para garantir que a organização alcança as suas metas de redução de carbono.

O relatório

Após o preenchimento completo de todos os campos exigidos pela ferramenta **RoadToZero – Stone Carbon Calculator**, é automaticamente gerado um relatório detalhado de cálculo de emissões de CO₂. Nele consta o diagnóstico atual de emissões de CO₂ da empresa e a simulação de cenários de descarbonização. São apresentados vários cenários alternativos, resultantes da aplicação de medidas concretas de redução de emissões, que abrangem diferentes tipos de intervenção, desde a adoção de energias renováveis e melhorias de eficiência energética, até à substituição de equipamentos ou alterações nos processos logísticos e produtivos.

Para cada cenário proposto, é feita uma estimativa da redução potencial de emissões e o impacto correspondente na diminuição global das emissões de CO₂ da organização. Esta análise comparativa fornece uma base sólida para a tomada de decisões estratégicas, ajudando as empresas do setor da Pedra Natural a traçar um plano de transição climática alinhado com os objetivos de neutralidade carbónica, promovendo a competitividade e a sustentabilidade a longo prazo.







07.

Capacitar para a descarbonização



Desafios

Escassez de mão-de obra

Atualmente a escassez de mão-de-obra, 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.



Caminhos

- Mapear, através de uma projecção 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).



Skills



Melhorar o desempenho energético, capacitando para a identificação de processos de melhoria da **Eficiência Energética**;



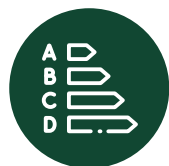
Conscientizar para o **Impacto da Tecnologia** (Sensores, Robots, IoT, *Big Data*, *Cloud Computing*, IA, *Machine Learning* e outros recursos inteligentes), para a recolha de dados, para a resposta rápida e eficiente e para a desmaterialização de processos;



Identificar processos que possam ser alvo de **Automatização**, **Sensorização** ou **Robotização**;



Explorar o potencial de **Eletrificação e Integração de biocombustíveis**;



Reduzir **Consumos Energéticos e Custos Operacionais**;



Potenciar a **Economia Circular e Simbioses Industriais**, analisando criteriosamente os subprodutos resultantes da atividade de extração ou beneficiação.



Criar estratégias e práticas de **Ecodesign**, no desenvolvimento de produtos e processos mais sustentáveis, menos exigentes em recursos, mantendo-os dentro de um circuito fechado;



Explorar processos e metodologias de **Captura de (emissões) CO₂**, resultantes dos processos industriais;





08.

Considerações finais



Considerações finais

Principais vetores de descarbonização para o setor

Eficiência energética – Implementação de sistemas de gestão de energia e modernização de equipamentos



Eletrificação - Integração de fontes renováveis (ex. solar fotovoltaico) e eletrificação dos processos



Combustíveis de baixo carbono - Como biodiesel ou HVO, especialmente em maquinaria pesada



Economia circular - Valorização de resíduos, como lamas e fragmentos, simbioses industriais com outros setores industriais



Digitalização - Sensorização e IoT para monitorização em tempo real, IA para otimização de processo e manutenção preditiva



Tecnologias de remoção de CO₂ - Em atividades que geram emissões diretas inevitáveis, exigindo soluções tecnológicas dedicadas à captura e armazenamento de CO₂



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.

A redução significativa das emissões depende, em muitos casos, 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.



Especialistas e entidades convidadas

O Roteiro para a Descarbonização do Setor da Pedra Natural contou com a participação de especialistas convidados, provenientes 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 (IPL - Instituto Politécnico de Leiria)

Frederico 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)

Diogo Caupers, Maria da Luz Alvim (Casa da Mesquita)

Ricardo Barbosa, Cátia Sofia Costa, Isabel Azevedo, Ivo Cardoso, João Pedro Cardoso, Maria Margarida Vieira, Roberto Carlos Ribeiro (INEGI – Instituto de Ciência e Inovação em Engenharia Mecânica e Engenharia Industrial)



Projeto de



ASSIMAGRA
RECURSOS MINERAIS DE PORTUGAL

Equipa técnica



PRR
Plano de Recuperação
e Resiliência



**REPÚBLICA
PORTUGUESA**



Financiado pela
União Europeia
NextGenerationEU