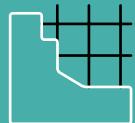




Construction
to Zero



Manual Setorial de Descarbonização

BETÃO PRONTO

CAE 23630

FICHA TÉCNICA

Designação do documento

Roteiro de Descarbonização para a fileira da construção e atividades industriais associadas

Manual Setorial de Descarbonização

Betão Pronto – CAE 23630

Promotor/Editor

Plataforma Tecnológica Portuguesa da Construção (PTPC) e Associação Portuguesa de Cimento (ATIC)

Autoria

Plataforma Tecnológica Portuguesa da Construção (PTPC) e Associação Portuguesa de Cimento (ATIC), com o apoio da 3drivers – Engenharia, Inovação e Ambiente SA e BUILT CoLAB – Laboratório Colaborativo para o Ambiente Construído do Futuro

Equipa de trabalho

Coordenação

Fátima Rato (ATIC) e Filomena Duarte (PTPC/Cluster AEC)

Equipa Técnica

Ana Mestre (3drivers), António Lorena (3drivers), Carolina Rosa (Ecoprogresso), Catarina Silva (BUILT CoLAB), João Pedro Capa (ATIC), Leonor Santos (BUILT CoLAB), Lurdes Laranjeira (BUILT CoLAB), Susana Ribeiro (Ecoprogresso), Vanessa Tavares (BUILT CoLAB), Vera Durão (3drivers)

Co-financiamento

Elaborado com o apoio da União Europeia – NextGenerationEU, no âmbito do PRR – Plano de Recuperação e Resiliência.



PRR
Plataforma Tecnológica Portuguesa
da Construção



**REPÚBLICA
PORTUGUESA**



Financiado pela
União Europeia
NextGenerationEU



Data

Outubro de 2025

ÍNDICE

01. Acrónimos	4
02. Sumário Executivo	4
03. Enquadramento	4
04. Caracterização do Setor	5
Empresas e Mercado	5
Processo Produtivo e Ciclo de Vida	5
Perfil Energético e de Emissões	6
05. Boas Práticas Setoriais	7
06. Medidas de Descarbonização	7
Avaliação de Impacte das Medidas de Descarbonização	9
07. Trajetórias de Descarbonização	11

01. ACRÓNIMOS

ACV	Avaliação de Ciclo de Vida
BAU	<i>Business-As-Usual</i>
CCUS	<i>Carbon Capture, Utilisation and Storage</i>
CO ₂ e	Dióxido de Carbono Equivalente
DGEG	Direção Geral de Energia e Geologia
GEE	Gases com Efeito de Estufa
GNC	Gás Natural Comprimido
HVO	<i>Hydrotreated Vegetable Oil</i>
PNEC	Plano Nacional de Energia e Clima
RCD	Resíduos de Construção e Demolição
RNC2050	Roteiro para a Neutralidade Carbónica 2050
UPAC	Unidade de Produção para Autoconsumo

02. SUMÁRIO EXECUTIVO

O Manual de Descarbonização do Setor do Betão Pronto surge como um instrumento técnico e estratégico essencial para apoiar o processo de descarbonização de um dos setores industriais mais relevantes e intensivos em recursos da economia nacional. O setor do Betão Pronto assume um papel estruturante na cadeia de valor da construção civil e das infraestruturas, sendo responsável por assegurar o fornecimento de um material indispensável à construção de edifícios, obras públicas, sistemas de mobilidade e equipamentos sociais.

Face aos compromissos assumidos a nível nacional e europeu, nomeadamente a meta de neutralidade carbónica até 2050 e os objetivos vinculativos em matéria de redução de emissões e eficiência energética, torna-se imperativo que o setor do Betão Pronto adote medidas concretas de descarbonização. Esta transformação deve assentar numa abordagem integrada, assente nos princípios de eficiência no uso dos recursos e dos princípios de economia circular e que combine inovação tecnológica, reconfiguração de processos, valorização de materiais alternativos e reorganização logística, sem comprometer a qualidade, a fiabilidade e o desempenho do produto.

Entre os temas abordados neste Manual incluem-se, de forma transversal, a valorização de resíduos e subprodutos industriais, a otimização do uso de energia, a incorporação de tecnologias de produção e monitorização digital e o prolongamento da vida útil das estruturas em betão por via de formulações mais duráveis e adaptadas às condições ambientais. Estas ações, quando articuladas, permitem ganhos simultâneos em termos ambientais, técnicos e económicos.

O setor é composto por um número reduzido de empresas que são, na sua maioria, micro e pequenas empresas. Pela sua natureza, é um setor orientado para o mercado interno e, em 2023, registou um volume de negócios de 548 milhões de euros. É um setor de elevada intensidade energética e carbónica, com uma dependência significativa de combustíveis fósseis, em que o gasóleo é um dos vetores energéticos mais intensivos, associado à logística de transporte e utilização do betão. Adicionalmente, o setor está dependente de matérias-primas muito intensivas em carbono, como o cimento, que torna, por sua vez, a pegada carbónica do Betão Pronto muito significativa.

Com a crescente exigência de desempenho ambiental, é de notar a adopção de boas práticas na fabricação de Betão Pronto, apoiadas nos princípios de economia circular e de eficiência na utilização de recursos. Entre as mais significativas destacam-se a incorporação parcial de agregados reciclados, como é o caso dos resíduos de construção e demolição (RCD), a reciclagem de betão fresco excedentário, e a gestão eficiente dos recursos hídricos.

Neste Manual são modelados um conjunto de possíveis cenários de descarbonização que ilustram diferentes graus de evolução até 2050: o cenário *Business-As-Usual* (BAU), *Baseline* e *Neutralidade Carbónica*. O cenário BAU considera a projeção de crescimento do setor até 2050, sem que nenhuma ação de descarbonização seja implementada.

O cenário *Baseline* atinge uma redução de emissões globais de 26% face ao BAU, que decorre apenas da descarbonização parcial dos setores a montante e jusante, e que impactam diretamente o setor do Betão Pronto, como o setor do cimento, dos transportes e da rede elétrica nacional. No cenário *Neutralidade Carbónica*, o setor do Betão Pronto implementa medidas de descarbonização da sua atividade na fabricação e transporte, e os setores a montante e jusante da sua atividade também descarbonizam numa proporção mais significativa. Neste cenário, estima-se uma redução de 99% das emissões do setor, face ao cenário BAU, e aproximando-se da neutralidade carbónica. Neste cenário consideram-se os benefícios da reciclagem parcial do betão em fim de vida, e a descarbonização da produção de cimento (com a integração de tecnologias de captura e armazenamento de carbono).

03. ENQUADRAMENTO

O setor do Betão Pronto ocupa uma posição estratégica na cadeia de valor da construção civil e das infraestruturas urbanas, caracterizando-se como um dos principais consumidores de matérias-primas minerais e um dos maiores emissores de gases com efeito de estufa (GEE). A elevada intensidade carbónica resulta, em grande parte, da fase de produção, devido à utilização predominante do cimento *Portland* nas formulações do betão, cuja produção é intensiva em energia e emissões, assim como do consumo substancial de energia e combustíveis fósseis inerente às operações industriais, logísticas e de bombagem.

Face aos compromissos vinculativos assumidos a nível nacional e europeu no quadro da ação climática, nomeadamente os objetivos preconizados no Roteiro Nacional para a Neutralidade Carbónica 2050 (RNC2050)¹, e o Plano Nacional de Energia e Clima 2030 (PNEC), o setor do Betão Pronto encontra-se perante o imperativo de reduzir de forma significativa a sua pegada carbónica ao longo do ciclo de vida do produto. A descarbonização deste setor, crucial para a sustentabilidade da construção civil, exige a implementação integrada de medidas técnicas, operacionais e organizacionais estruturadas em quatro pilares fundamentais:

Eficiência de materiais: otimização das formulações de betão, incorporação de materiais suplementares cimentícios, redução do teor de cimento *Portland* e aumento da durabilidade do produto, de modo a minimizar a intensidade carbónica específica do betão produzido;

Energia e Eficiência Energética: substituição progressiva dos combustíveis fósseis por fontes renováveis e de baixo carbono nos processos produtivos, promovendo a electrificação das operações e a utilização de biocombustíveis, gás natural renovável, hidrogénio verde e outros vetores energéticos inovadores e de baixo carbono;

Transportes e Logística: reestruturação das cadeias de abastecimento e transporte, visando a minimização das emissões associadas ao transporte das matérias-primas e do produto acabado, através de rotas otimizadas, meios de transporte de baixo carbono e eficiência na gestão de frota;

Inovação e Digitalização: aplicação de tecnologias digitais para monitorização em tempo real, controlo e otimização dos processos produtivos e logísticos, inovação e apoio à tomada de decisão baseada em dados, contribuindo para a redução dos desperdícios e melhoria contínua dos indicadores ambientais.

As medidas de descarbonização propostas dentro de cada eixo atuam ao longo do ciclo de vida do produto, garantindo que os impactes são reduzidos em toda a cadeia de valor, desde a incorporação das matérias-primas na fase de produção, passando pela fase operacional, contribuindo para uma melhor gestão ao longo da sua vida útil até à fase de fim de vida.

O presente Manual visa fornecer um referencial técnico e estratégico abrangente, que apoie as entidades do setor do Betão Pronto na adoção de práticas e tecnologias alinhadas com os princípios da sustentabilidade ambiental, da eficiência no uso de recursos e da inovação tecnológica. Através da implementação destas orientações, pretende-se contribuir decisivamente para a redução das emissões líquidas de carbono do setor, garantindo simultaneamente a qualidade, segurança e desempenho dos materiais e soluções construtivas.

04. CARACTERIZAÇÃO DO SETOR

Empresas e Mercado

O setor da fabricação de Betão Pronto (CAE 23630) constitui uma componente estruturante da indústria da construção, desempenhando um papel estratégico no fornecimento de betão a obras de edificação, infraestruturas de transporte, projetos hidráulicos e empreendimentos industriais. Trata-se de uma atividade intensiva em capital fixo, energia e matérias-primas minerais, cuja operação é caracterizada por uma forte implantação territorial e por uma elevada dependência de logística especializada e eficiente, dada a natureza perecível do produto e a exigência de proximidade entre os centros de produção e os locais de aplicação.

Em 2023, encontravam-se registadas 41 empresas², evidenciando-se um decréscimo contínuo do número de operadores ao longo dos últimos cinco anos. Esta tendência poderá ser explicada por diversos fatores estruturais, nomeadamente a concentração progressiva do mercado, a crescente exigência de investimentos em equipamentos e tecnologias, e a flutuação da procura no setor da construção civil.

Do ponto de vista da estrutura empresarial, o setor apresenta uma predominância de micro e pequenas empresas, que constituem a base produtiva a nível nacional. Esta configuração influencia de forma direta a capacidade de investimento, a adoção de tecnologias de baixo carbono e o grau de digitalização dos processos produtivos e logísticos, sendo um fator determinante no ritmo de transição para modelos de produção mais sustentáveis.

Pela natureza da sua atividade, trata-se de um setor fortemente orientado para o mercado interno. Em 2023, aproximadamente 99,5% do volume de negócios (548 milhões de euros)³ teve origem em operações nacionais, sendo as exportações residuais. Esta realidade decorre da baixa transacionalidade do produto, condicionada pela vida útil limitada do betão fresco, pelas restrições técnicas ao transporte e pela exigência de proximidade geográfica entre a unidade de produção e o local de aplicação.

A nível territorial, a distribuição das empresas evidencia uma concentração significativa em cinco regiões NUT III, coincidentes com os principais centros urbanos e áreas de maior densidade construtiva. Estas regiões assumem, por conseguinte, um papel estratégico na definição e implementação de políticas públicas de descarbonização, assim como na instalação de infraestruturas logísticas, energéticas e industriais de apoio à transição climática do setor.

Em termos de produção tem vindo a registar-se um crescimento com tendência de abrandamento desde 2019⁴. A previsão de evolução do setor, indexada à evolução da produção de cimento considerada na revisão do PNEC2030 e RNC2050, sugere uma redução da produção a uma taxa anual de -0,27% entre 2025 e 2034 e de -0,23% entre 2035 e 2050.

Processo Produtivo e Ciclo de Vida

O processo de fabrico de Betão Pronto é uma operação industrial sequencial, altamente mecanizada e sujeita a requisitos normativos rigorosos⁵ que integra diversas etapas, técnicas, desde o aprovisionamento das matérias-primas até à entrega do produto em obra. A cadeia produtiva desenvolve-se num sistema fechado, centralizado nas instalações industriais (centrais de betão), com dependência crítica de logística rodoviária especializada para garantir o desempenho do produto no ponto de aplicação.

O processo tem início com o aprovisionamento e armazenamento das matérias-primas, nomeadamente agregados (areias, britas ou materiais reciclados), cimento (habitualmente do tipo Portland ou misturas com adições minerais), adjuvantes químicos e água. Os materiais são fornecidos maioritariamente por via rodoviária e armazenados em silos, reservatórios ou boxes segregadas, de forma a assegurar a integridade físico-química e a rastreabilidade dos lotes.

A etapa seguinte consiste na dosagem automatizada dos constituintes, segundo traços de mistura previamente definidos, otimizados para garantir os requisitos de resistência mecânica, durabilidade, trabalhabilidade e compatibilidade com o ambiente de exposição. A dosagem é realizada por sistemas eletrónicos de pesagem e controlo, garantindo precisão na formulação do betão.

Após a dosagem, os materiais são introduzidos num misturador de eixo horizontal ou planetário, onde ocorre a homogeneização controlada da mistura. Dependendo do tipo de central e do nível de automação, o betão pode ser completamente produzido na central (betão centralizado) ou parcialmente misturado, sendo finalizado durante o transporte (betão em trânsito). O processo de mistura incorpora consumo de energia elétrica, contribuindo para o perfil energético da unidade produtiva.

Durante a produção, são implementados mecanismos de controlo de qualidade em tempo real, com verificação de parâmetros críticos como o abatimento (slump), a temperatura, a densidade e a resistência prevista à compressão. Estes ensaios laboratoriais, realizados de acordo com as normas em vigor (ex. NP EN 206⁶), asseguram a conformidade com as especificações técnicas e possibilitam a rastreabilidade da produção.

Concluída a mistura, o betão é transferido para camiões-betoneira rotativos, dimensionados para manter a integridade da mistura fresca durante o transporte até ao estaleiro. O transporte constitui uma fase crítica, dado que a estabilidade do betão depende da manutenção da agitação e do controlo do tempo entre a mistura e a aplicação (geralmente inferior a 90 minutos). Esta fase é particularmente relevante do ponto de vista ambiental, por representar um vetor dominante no consumo de combustíveis fósseis (maioritariamente gasóleo) e nas emissões diretas de GEE.

Na obra, o betão é descarregado e sujeito a operações de aplicação, bombagem e compactação, com recurso a bombas estacionárias ou autobombas. A adequada coordenação logística e técnica com as frentes de obra é fundamental para garantir a qualidade da execução e a conformidade com os requisitos estruturais e funcionais da aplicação.

O processo produtivo do Betão Pronto pode ser avaliado em termos do seu impacte ambiental ao longo do ciclo de vida do produto, de acordo com os princípios metodológicos estabelecidos na norma EN 15804+A2⁷ (representado esquematicamente na Figura 1). Esta abordagem permite considerar, de forma integrada, os impactes ambientais do fornecimento de matérias-primas, do fabrico, do transporte, da instalação em obra, da fase de utilização e das etapas de fim de vida, bem como os benefícios associados à reutilização, recuperação ou reciclagem dos materiais.

² INE. (2025). Base de Dados, Empresas (Nº). Disponível em: [Portal do INE](http://www.ine.pt)

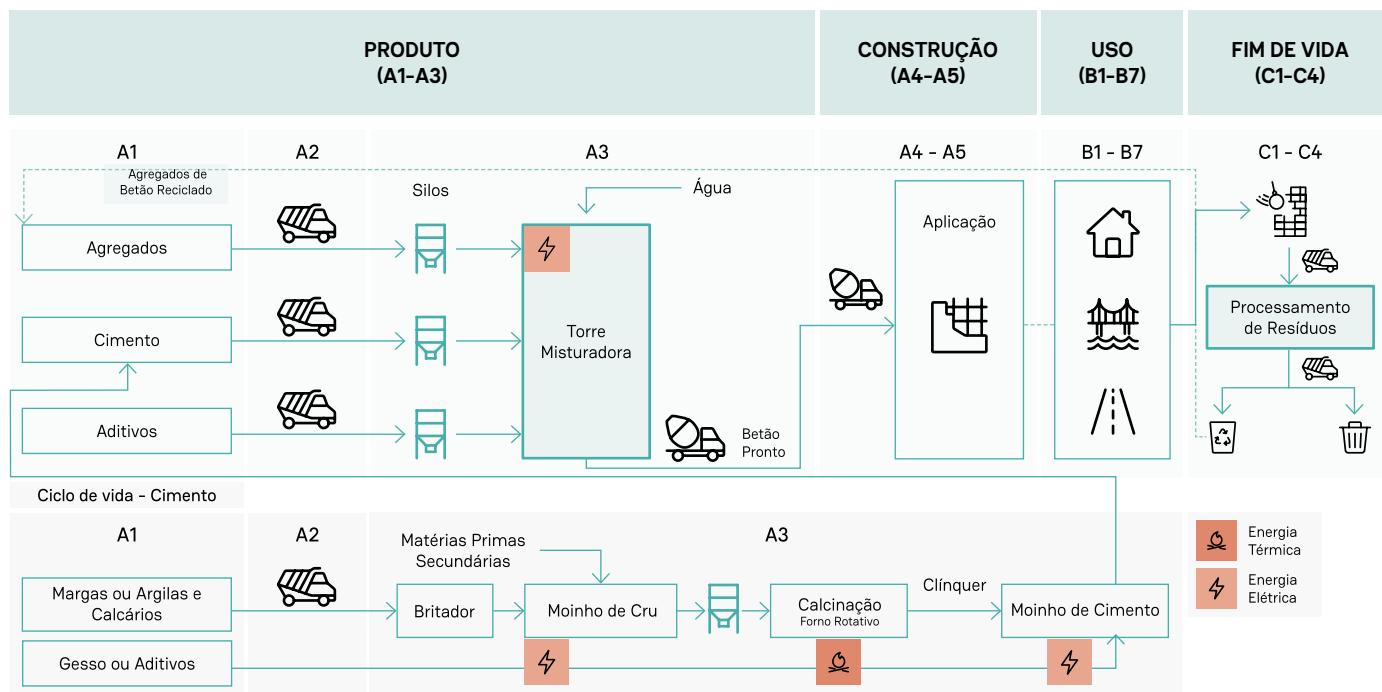
³ INE. (2025). Base de Dados, Volume de Negócios. [Portal do INE](http://www.ine.pt)

⁴ APEB. (2025). Dados estatísticos - Indústria de Betão Pronto 2024. Ed. APEB.

⁵ Normas e especificações: NP EN 206-1:2007 + A1:2016; NP EN 206-10:2006; NP EN 206-11:2009; NP EN 13670:2011; NP EN 934-2:2009

⁶ https://www.apeb.pt/Docs/Betao38_NPEN206P2.pdf

⁷ https://daphabitat.pt/assets/Uploads/rpc/pdfs/a52357e62f1-RCP-modelo-base_PT_v2.3-2023_retr.pdf



A1 – Fornecimento de Matérias Primas; A2/A4/C2 – Transporte; A3 – Fabricação; A5 – Construção e instalação; B1 – Utilização; B2 – Manutenção; B3 – Reparação; B4 – Substituição; B5 – Reabilitação; B6 e B7 – Uso operacional de energia, e água; C1 – Desconstrução; C3 – Processamento de Resíduos; C4 – Eliminação; D – Reutilização, Recuperação, Potencial Reciclagem

Figura 1. Etapas do ciclo de vida do Betão Pronto

Este enquadramento técnico evidencia os principais pontos críticos em termos de desempenho energético e emissões, destacando a **elevada dependência de combustíveis fósseis na logística de transporte**, o consumo elétrico nas operações de mistura e controlo, o **uso intensivo de matérias-primas com elevada pegada carbónica**, especialmente o clínquer, e o potencial de valorização de resíduos e subprodutos ao longo do ciclo de vida.

Perfil Energético e de Emissões

A fabricação de Betão Pronto caracteriza-se por uma elevada intensidade energética e carbónica. De acordo com dados disponibilizados pela Direção Geral de Energia e Geologia (DGEG), o setor registou em 2023 um consumo de energia final de 327 073 GJ⁸ em Portugal.

De acordo com os dados analisados, verifica-se uma elevada dependência de combustíveis fósseis, com o gasóleo a representar 89% do consumo total, utilizado predominantemente nas viaturas de transporte (camiões-betoneira) e, em menor proporção, nos equipamentos móveis e instalações fixas das centrais de produção.

A eletricidade representa 11% do consumo energético e é utilizada predominantemente em sistemas de mistura, bombas, unidades de controlo e iluminação. Não foi reportado qualquer consumo de GPL, gás natural, resíduos renováveis e não renováveis.

Com base nestes dados, é possível estimar as emissões diretas e indiretas de GEE (âmbito 1 e 2) do setor em 2023, que ascendem a 21 668 toneladas de dióxido de carbono equivalente (tCO₂e). Destas, 99,99% são decorrentes do consumo de gasóleo, sendo o contributo da eletricidade residual. Esta intensidade carbónica reflete a ausência de fontes de energia renovável no mix energético das unidades de produção e o peso da logística associada. Estas emissões refletem apenas o consumo nas etapas de fabricação e transporte do Betão Pronto.

As emissões associadas à etapa de extração e transporte de matérias-primas e fim de vida (âmbito 3) do Betão Pronto também foram estimadas para a situação de referência, e as emissões totais são apresentadas na Figura 2.

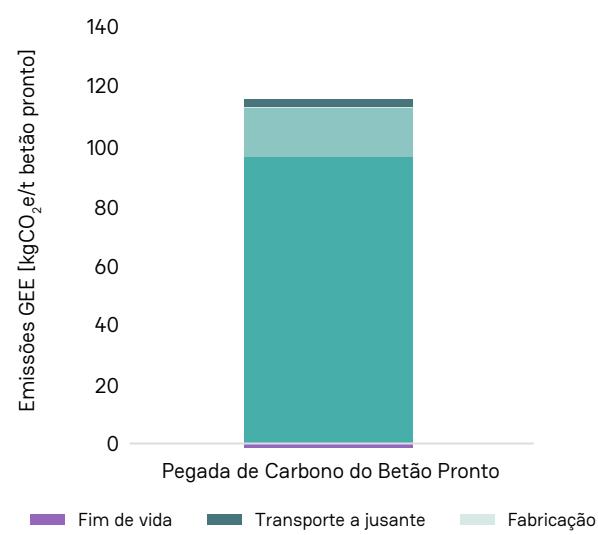


Figura 2. Contribuição das diferentes etapas de ciclo de vida para a pegada de carbono do Betão Pronto (situação de referência: 2023).

A estimativa da pegada de carbono do Betão Pronto resulta em 115 kgCO₂e por tonelada de produto. A extração das matérias-primas tem um impacte muito significativo na pegada de carbono do Betão Pronto, representando mais de 80% das emissões de GEE. Dentro da extração das matérias-primas, a descarbonatação do cimento representa 78% das emissões, pelo que constitui um eixo fundamental na descarbonização do Betão Pronto.

05. BOAS PRÁTICAS SETORIAIS

A crescente exigência de desempenho ambiental, normativo e funcional no setor da construção tem impulsionado a adoção de boas práticas na fabricação e aplicação do Betão Pronto. Alinhadas com os princípios da construção sustentável e da economia circular, estas práticas visam reduzir o consumo de recursos primários, minimizar os impactes ambientais e otimizar o desempenho técnico e económico ao longo do ciclo de vida das estruturas. As inovações tecnológicas e operacionais atualmente implementadas, ou em fase de implementação, têm demonstrado um contributo significativo para a descarbonização progressiva do setor, a eficiência na gestão de materiais e água, e o reforço da durabilidade e resiliência das estruturas em betão.

Uma das áreas de maior impacte está associada à **substituição de matérias-primas convencionais e à valorização de resíduos**. A substituição parcial de agregados naturais por agregados reciclados, obtidos a partir de resíduos de construção e demolição (RCD), integra uma lógica de economia circular, contribuindo para a redução da pressão sobre os recursos primários e para a diminuição do volume de resíduos enviados para aterro. Esta substituição, quando compatível com os requisitos técnicos definidos nas normas aplicáveis, permite manter a conformidade estrutural do produto, potenciando ainda benefícios em termos de trabalhabilidade e eficiência de compactação.

Complementarmente, a incorporação de **adições minerais** como cinzas volantes, escórias moídas ou filler calcário⁸ tem um duplo efeito positivo: (i) reduz o teor de cimento no betão – fator determinante na redução das emissões – e (ii) melhora diversas propriedades do betão, nomeadamente a durabilidade em ambientes agressivos e a resistência mecânica a médio-longo prazo. Estas adições, de natureza pozolânica ou hidráulica latente, contribuem para a densificação da matriz cimentícia e prolongam a vida útil das estruturas.

Outra boa prática relevante é a **reciclagem interna do betão fresco excedentário**, realizada através de sistemas de separação de agregados e recuperação da pasta cimentícia. Esta medida, associada à **otimização das composições do betão**, permite reduzir significativamente o consumo específico de cimento, mantendo os níveis de desempenho estrutural. A sua aplicação contribui para uma gestão mais eficiente dos recursos e para a redução da intensidade carbónica do processo produtivo.

No que respeita à **gestão dos recursos hídricos**, a indústria do Betão Pronto tem vindo a adotar soluções de reaproveitamento de águas de lavagem de betoneiras, sistemas de decantação e clarificação de águas residuais, bem como dispositivos de captação e armazenamento de águas pluviais. A integração destas tecnologias em modelos de ciclo fechado permite reduzir significativamente o consumo hídrico por metro cúbico de betão produzido e, simultaneamente, reforçar a resiliência operacional das centrais face a contextos de escassez ou restrições de uso da água. A monitorização sistemática da qualidade da água reaproveitada é essencial para assegurar a compatibilidade com os parâmetros técnicos exigidos no processo produtivo.

A **durabilidade e a resiliência estrutural** assumem também um papel central na sustentabilidade do setor. A formulação de betões adaptados a condições ambientais agressivas, com resistência à penetração de agentes agressivos e à fissuração induzida por retracções ou cargas térmicas, permite prolongar a vida útil das estruturas, reduzir intervenções de manutenção e minimizar os impactes ambientais e económicos ao longo do ciclo de vida. A adoção de planos de manutenção preventiva e a utilização de ferramentas preditivas de deterioração estrutural permitem antecipar anomalias e reforçar a resiliência dos ativos construídos face a solicitações extremas, como eventos climáticos severos, sismos ou variações térmicas acentuadas.

Do ponto de vista do **desempenho energético**, o betão destaca-se pelas suas propriedades térmicas passivas.

A elevada inércia térmica do material contribui para a estabilização das temperaturas interiores dos edifícios, reduzindo as necessidades energéticas associadas à climatização e, consequentemente, o impacte ambiental na fase de utilização. Este contributo passivo reforça a eficiência energética dos edifícios e deve ser valorizado em estratégias de conceção bioclimática.

No final da sua vida útil, o betão pode ser **reutilizado ou reciclado como agregado em novas formulações**, promovendo o encerramento do ciclo de materiais e reduzindo a necessidade de extração de inertes primários. A valorização dos resíduos de demolição depende da triagem seletiva em obra e do investimento em tecnologias de britagem, separação e classificação. Estes avanços permitem garantir uma qualidade compatível com as exigências das novas aplicações estruturais ou não estruturais.

A inovação mais disruptiva em fase de demonstração tecnológica no setor é a aplicação de **tecnologias de captura e utilização de carbono (CCUS)**. Estas soluções permitem a incorporação de CO₂ mineralizado no fabrico do betão, criando um ciclo fechado entre a produção de cimento e o produto final. As abordagens mais comuns incluem a injeção de CO₂ durante a fase de mistura (carbonatação acelerada) e a utilização de agregados previamente carbonatados. Estas práticas têm o potencial de reduzir significativamente as emissões líquidas de GEE, reforçando o contributo do setor para os objetivos de neutralidade carbónica.

As boas práticas implementadas no setor da fabricação de Betão Pronto evidenciam o seu potencial de alinhamento com os princípios da sustentabilidade e da economia circular. A sua aplicação sistemática representa uma via técnica robusta para o cumprimento das metas definidas pelo Pacto Ecológico Europeu, pela taxonomia ambiental da União Europeia e pelos requisitos das normas de construção de baixo carbono.

06. MEDIDAS DE DESCARBONIZAÇÃO

A produção de Betão Pronto com baixa pegada carbónica exige a implementação coordenada de medidas técnicas, regulatórias e organizacionais, suportadas por políticas públicas que assegurem incentivos, normas harmonizadas e acesso facilitado a financiamento. As medidas de descarbonização organizam-se em torno de quatro vetores fundamentais de descarbonização:

Eficiência de Recursos, Materiais e Processos

Através da reformulação das composições do betão, promovendo incorporação de cimentos com menor emissão de GEE, e a incorporação de resíduos e subprodutos industriais, e a maximização do potencial de circularidade ao longo do ciclo de vida do produto.

Energia e Eficiência Energética

Promovendo a adoção de fontes de energia renovável e a melhoria contínua do desempenho energético das unidades de produção.

Transportes e Logística

Por meio da substituição progressiva da frota por veículos de baixo carbono e da otimização dos fluxos logísticos e operacionais.

Ecodesign, Inovação e Digitalização

Integrando tecnologias digitais e soluções inovadoras que permitam o controlo em tempo real, o aumento da eficiência produtiva e o desenvolvimento de materiais e processos de baixo impacte ambiental.

Eficiência de Recursos, Materiais e Processos



01. Incorporação de Agregados Reciclados

O uso de agregados reciclados de RCD é uma medida-chave para reduzir o consumo de recursos naturais e emissões de GEE, promovendo a valorização de resíduos e a economia circular no setor, ao mesmo tempo que diminui o impacte ambiental do ciclo de vida do betão. Contudo, a adoção desta medida depende da capacidade de superar os desafios técnicos (variabilidade granulométrica, presença de impurezas, influencia na trabalhabilidade) e de garantir a normalização, rastreabilidade dos materiais e uma logística fiável e contínua.

02. Integração de Subprodutos Industriais com Propriedades Cimentícias

A redução do teor de clínquer no cimento pode ser alcançada com recurso a materiais cimentícios adequando simultaneamente a respetiva curva granulométrica. No betão a substituição parcial do cimento por subprodutos industriais com propriedades pozolânicas ou hidráulicas latentes, como escórias de alto-forno, cinzas volantes ou fillers calcários contribuem também para a redução de emissões carbónicas. A incorporação pode ocorrer em duas fases distintas: (i) durante o fabrico do cimento, originando cimentos de baixo teor carbónico, ou (ii) diretamente na central de betão, através da adição destes materiais à composição do betão e reduzindo a percentagem de cimento no mesmo. Em ambos os casos, a substituição contribui para uma diminuição significativa das emissões de CO₂, constituindo uma solução técnica e ambientalmente vantajosa.

03. Cimentos com Baixa Incorporação de Clínquer

A utilização de cimentos com menor teor de clínquer (ou cimentos compostos inovadores) é central para descarbonizar o setor, reduzindo a intensidade carbónica por tonelada, sem comprometer o desempenho em aplicações estruturais e não estruturais. Os principais entraves são a menor resistência inicial (afetando a descobragem e a rotatividade de moldes), a adaptação dos processos produtivos e a atualização de especificações técnicas em cadernos de encargos públicos e privados.

04. Reciclagem de Betão Fresco

A reciclagem de betão fresco excedentário permite reaproveitar de imediato agregados e água, reduzindo o volume de resíduos e aumentando a eficiência das centrais. Exige equipamentos de separação, decantação e reaproveitamento, bem como protocolos de controlo da qualidade dos materiais reintroduzidos. Esta medida traduz-se em ganhos ambientais diretos, nomeadamente a redução do consumo de matérias-primas virgens e da pegada hídrica, constituindo uma boa prática já operacionalizada em diversas unidades industriais de referência.

05. Carbonatação Acelerada de Agregados Reciclados

A adoção de técnicas de carbonatação acelerada de agregados reciclados consiste na indução química da reação entre CO₂ capturado e os constituintes minerais dos agregados com o objetivo de capturar carbono de forma estável e permanente. Esta solução permite simultaneamente valorizar resíduos, estabilizar propriedades dos agregados reciclados e reduzir as emissões líquidas do processo produtivo. Embora tecnologicamente promissora, esta medida encontra-se ainda em fase de maturação normativa e requer estudos adicionais de desempenho mecânico e durabilidade a longo prazo.

Energia e Eficiência Energética



01. Produção de energia elétrica e térmica a partir de fontes de energia renováveis

A instalação de sistemas de produção de energia renovável, nomeadamente painéis solares fotovoltaicos para autoconsumo, sistemas solares térmicos ou caldeiras alimentadas a biomassa, permite reduzir significativamente as emissões dos âmbitos 1 e 2. A viabilidade técnica desta medida depende da disponibilidade de área útil, da irradiação solar local e da estabilidade dos regimes de compensação energética. Do ponto de vista económico, o investimento inicial tende a ser amortizado em períodos inferiores a 10 anos, sendo frequentemente apoiado por programas públicos de incentivo à transição energética na indústria.

Transportes e Logística



01. Substituição de veículos a combustão fóssil por combustíveis de baixo carbono

A substituição progressiva dos camiões-betoneira e viaturas de abastecimento por veículos com menores emissões (movidos a biocombustíveis, gás natural comprimido (GNC), hidrogénio verde ou eletricidade), constitui uma medida estruturante de descarbonização logística. Esta transição exige investimentos significativos, análise de viabilidade técnico-económica, e o desenvolvimento paralelo de infraestruturas de abastecimento e manutenção.

02. Otimização de carga dos camiões-betoneira no transporte de betão

O aumento da carga útil dos camiões-betoneira de 32 para 36 toneladas, associado a uma gestão inteligente das rotas e dos tempos de entrega, permite reduzir o número de viagens, o consumo específico de combustível e as emissões unitárias por metro cúbico transportado. Esta medida, de fácil operacionalização, requer reavaliação das licenças de circulação, atualização das especificações técnicas da frota e utilização de ferramentas digitais de planeamento logístico.

03. Otimização das rotas de abastecimento das centrais de betão

A otimização das rotas de abastecimento nas centrais de betão reduz as emissões de GEE ao encurtar a cadeia logística, privilegiando fornecedores próximos e consolidando cargas.

Inovação, Ecodesign e Digitalização



01. Digitalização dos Fluxos Operacionais de Produção

A adoção de sistemas digitais de gestão integrada permite monitorizar em tempo real parâmetros críticos do processo produtivo, tais como consumos energéticos, dosagens de materiais, desempenho dos equipamentos e qualidade do betão. A digitalização reduz desperdícios, otimiza a gestão ambiental e permite decisões operacionais mais informadas. A tecnologia necessária encontra-se amplamente disponível no mercado, com custos acessíveis e retorno rápido do investimento.

Apesar de ainda se encontrar numa fase de demonstração técnica e piloto em contextos europeus, esta tecnologia apresenta um elevado potencial de mitigação das emissões líquidas de CO₂ do setor e está alinhada com os objetivos de inovação em materiais de construção de baixo carbono.

02. Carbonatação do Betão Fresco

A introdução controlada de CO₂ durante a fase de mistura do betão constitui uma técnica inovadora para promover a formação de carbonatos estáveis e, simultaneamente, melhorar certas propriedades mecânicas e de durabilidade do betão.

Avaliação de Impacte das Medidas de Descarbonização

As medidas de descarbonização propostas foram avaliadas em vários momentos de auscultação ao setor.

Foi realizada uma avaliação técnica da viabilidade de implementação das medidas e do seu custo e retorno económico esperado, cujos resultados da auscultação são apresentados na Figura 3 e Figura 4, respetivamente.

MEDIDA		Adequação ao setor (20%)	Facilidade de Implementação (20%)	Maturidade tecnológica (20%)	Custo investimento (20%)	Período de retorno (20%)	
7	Produção de energia elétrica e térmica a partir de fontes de energia renováveis	1	1	1	2	1,5	1,3
9	Otimização de carga dos camiões-betoneira no transporte de betão	1	1	1	3	1,5	1,5
2	Integração de escórias de fundição ou cinzas volantes	1	2	1	2	1,5	1,5
10	Digitalização dos fluxos operacionais de produção	1	2	2	2	1	1,6
5	Incremento da reciclagem do betão	1	1	1	3	2	1,6
3	Utilização de cimentos com baixa incorporação de clínquer	1	3	4	1	1	2,0
8	Substituição de veículos a combustão fóssil por combustíveis de baixo carbono	1	2	2	4	2,75	2,4
1	Incorporação de agregados reciclados	1	3	4	3	1,5	2,5
6	Uso de aditivos para carbonatar agregados provenientes de RCD	1	4	5	3	1,5	2,9
11	Carbonatação do betão fresco (incorporação de CO ₂)	2	5	5	4	1,5	3,5

* não foi avaliada a medida 4

Figura 3. Avaliação do impacte das medidas em sede de auscultação ao setor.

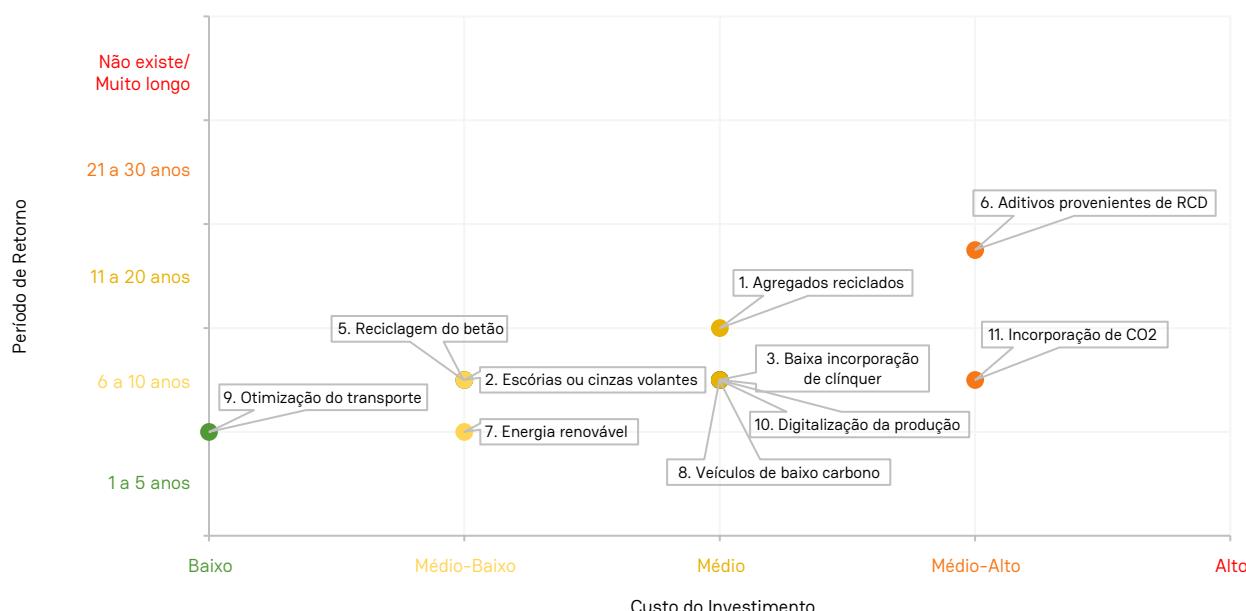


Figura 4. Avaliação do custo de investimento e período de retorno esperado das medidas propostas em sede de auscultação ao setor.

Tabela 1 – Medidas de descarbonização avaliadas para o setor do Betão Pronto

Vetor de Descarbonização	Medidas do modelo de ACV	Medidas propostas e avaliadas em sede de auscultação ao setor	Redução da pegada de carbono face à situação de referência	Custo (€) / Retorno (●) avaliados em sede de auscultação ao setor
Eficiência de Recursos, Materiais e Processos	Aumento de eficiência na fase de extração e processamento de agregados (50% da medida – reciclados e 50% – melhoria de eficiência de processos de extração e processamento) e aumento da reciclagem em fim de vida	Incorporação de agregados reciclados ¹⁰	-2,4% (eficiência e uso de reciclados) -1,0% (encaminhamento no fim de vida)	€€ / ●●
	Descarbonização por utilização de matérias secundárias e redução de quantidade de clínquer	Integração de subprodutos industriais com propriedades cimentícias (escórias de fundição, cinzas volantes, fillers e outros)	-20,7%	€ / ●
	Aumento de eficiência na fase de extração e processamento de matérias-primas e diminuição da incorporação de clínquer	Utilização de cimentos com baixa incorporação de clínquer	-3,4%	€€ / ●
	-	Incremento da reciclagem de betão fresco	-	€€ / ●
	Recarbonatação durante a vida útil (13%)	-	-3,0%	-
	Recarbonatação em fim de vida (12%)	Uso de aditivos para carbonatar agregados provenientes de RCD	-3,3%	€€€ / ●●●
CCUS na produção de cimento (Carbon Capture, Utilisation and Storage)		-28%	€€€ / ●●●●	
Energia e Eficiência Energética	Descarbonização da energia elétrica, p. ex. através da instalação de UPACs	Produção de energia elétrica e térmica a partir de fontes de energia renováveis	-0,003%	€€ / ●
	Substituição de combustíveis fósseis por outros alternativos nos processos de extração e processamento de matérias-primas do cimento e de agregados	-	-3,2% (matérias-primas cimento) -2,4% (agregados)	€€ / ●●
	Utilização de combustíveis alternativos (coprocessamento) na produção de clínquer	-	-20,3%	€€ / ●●
Transportes e Logística	Melhoria de eficiência e substituição de combustíveis fósseis por outras alternativas no transporte de matérias-primas e no de produto	Substituição de veículos a combustão fóssil por combustíveis de baixo carbono	-9,7% (transporte a montante) -2 % (distribuição a jusante)	€€ / ●●
		Otimização de carga dos camiões-betoneira no transporte de betão	-0,6%	€ / ●
		Otimização das rotas de abastecimento das centrais de betão	-	-
TOTAL			-99%	

Legenda

Período de Retorno:

● Até 5 anos ●● Entre 5 e 10 anos ●●● Entre 10 a 20 anos
 ●●●● Sem retorno, mas custos com tendência decrescente
 ●●●●● Sem retorno e custos não apresentam uma tendência decrescente

Custo Investimento:

€ - Baixo
 €€ - Médio
 €€€ - Alto

A Tabela 1 apresenta o conjunto de medidas de descarbonização avaliadas para o setor do Betão Pronto, agrupadas por vetor de descarbonização e comparando as abordagens do modelo de ACV com as propostas recolhidas na auscultação ao setor.

Para cada medida, é estimado o seu potencial de redução de emissões de GEE face à situação de referência e, sempre que possível, uma avaliação qualitativa dos custos e do retorno económico esperado.

07. TRAJETÓRIAS DESCARBONIZAÇÃO

A definição de trajetórias de descarbonização permite projetar o impacte das medidas de mitigação nas emissões de GEE ao longo do tempo, avaliando diferentes níveis de ambição tecnológica, operacional e regulatória.

A situação de referência para o setor do Betão Pronto foi definida como sendo o ano de 2023¹¹, a partir da qual se estimaram três trajetórias ao longo do período temporal 2025–2050. Foi definida uma trajetória de referência, o BAU, e dois cenários e dois cenários de descarbonização (Baseline e Neutralidade Carbónica).

Com base nas projeções constantes no PNEC2030 e RNC2050 para a produção nacional de cimento, considera-se um abrandamento na taxa de crescimento anual, passando de -0,27% entre 2025 e 2034, a -0,23% entre 2035 e 2050, que se assume também para o setor do Betão Pronto.

A trajetória de referência **BAU** assume a manutenção da situação atual (2023), apenas tendo em conta a taxa de crescimento anual do setor, não contemplando qualquer medida de descarbonização.

A trajetória **Baseline** assume que a transformação decorre principalmente de fatores exógenos, isto é, que não se encontram na influência direta das empresas do setor do Betão Pronto. Assume as tendências de descarbonização em setores que impactam diretamente o Betão Pronto: eficiência energética de processos a montante e a jusante, descarbonização no setor dos transportes (através de substituição de combustíveis) e descarbonização da rede elétrica nacional (RNC2050). A estas é também considerada a recarbonatação do betão durante a sua vida útil (12%).

A trajetória **Neutralidade Carbónica** inclui todas as medidas de descarbonização passíveis de implementar pelo setor, que são apresentadas neste Manual. Inclui também as medidas de descarbonização dos setores que o impactam diretamente e que foram incluídas no cenário *Baseline*.

A Figura 5 apresenta a trajetória de referência e as trajetórias de descarbonização que foram modeladas, até 2050.

Na trajetória BAU observa-se uma redução de 6% nas emissões totais do setor em 2050, face à situação de referência (2023).

Isto deve-se à projeção futura de produção de betão pronto que foi considerada como negativa, com uma redução anual. Com a concretização das medidas de descarbonização no cenário *Baseline* e *Neutralidade Carbónica*, é possível atingir reduções totais (líquidas, considerando a redução absoluta de emissões e o benefício da reciclagem, recarbonatação e CCUS) de cerca de -26% no *Baseline* e -99,4% no cenário da *Neutralidade Carbónica*, conforme representado no gráfico da Figura 6.

Na trajetória *Baseline*, a redução face ao BAU ocorre sobretudo das medidas relacionadas com as matérias-primas (-6,9 kgCO₂e/t), Transporte a montante e jusante (-8,4 kgCO₂e/t) e Fabricação (-4,7 kgCO₂e/t), medidas essas que ocorrem de forma independente ao setor de Betão pronto. Uma vez que não se observa a implementação de medidas de descarbonização no setor, a descarbonatação do cimento permanece o maior hotspot de emissões (a montante) na produção de betão, representando cerca de 62% do total de emissões deste cenário.

A descarbonização de setores a montante e jusante permite que o setor do Betão Pronto consiga descarbonizar cerca de 25% da sua pegada de carbono mas para atingir a neutralidade carbónica, o setor necessita de implementar ações de descarbonização de forma consistente e integrada.

Na trajetória Neutralidade Carbónica, é possível atingir uma redução total de emissões de 99%. As emissões remanescentes (Descarbonatação, Fabricação, Transporte a montante e a jusante e matérias-primas), ascendem a 43,6 kg CO₂e/t. A implementação da tecnologia de CCUS na produção de cimento permite a redução da pegada de carbono do betão em 32,24 kg CO₂e/t, que juntamente com a etapa da Recarbonatação e do Fim de vida, elevam a redução para 42,9 kg CO₂e/t, permitindo atingir um valor muito próximo da neutralidade carbónica, 0,64 kg CO₂e/t, tal como ilustrado na Figura 6.

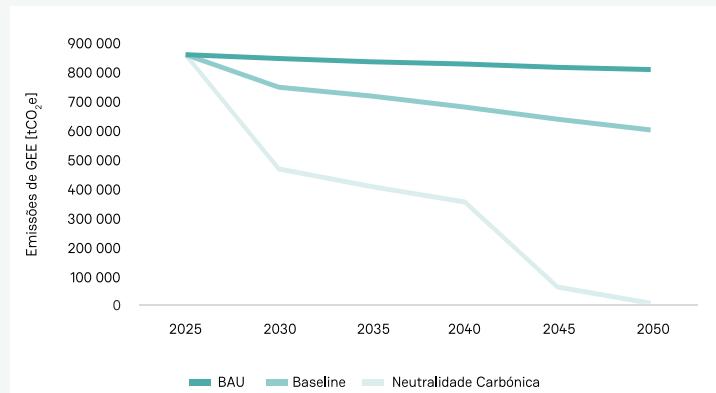


Figura 5. Comparação da trajetória de referência com as trajetórias de descarbonização do Betão Pronto até 2050

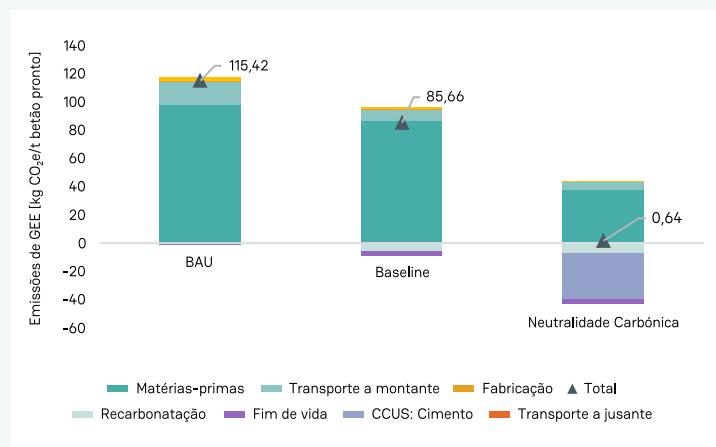


Figura 6. Comparação das trajetórias de referência e de descarbonização pelas etapas de ciclo de vida do Betão Pronto (emissões de GEE por tonelada de Betão Pronto)

As medidas com maior potencial de descarbonização no setor são relacionadas com a produção de cimento, a montante, sendo que no fabrico de betão pronto a medida com maior impacte é a da otimização do transporte do produto fresco até à obra. Esta pode ser conseguida através da otimização das cargas nos camiões-betoneira, da otimização das rotas de abastecimento das centrais e da substituição dos combustíveis utilizados por biocombustíveis ou outros combustíveis renováveis (e.g. HVO).

A tecnologia de CCUS aplicada à produção de cimento terá a capacidade de capturar em 2050 cerca de 38% das emissões a montante do setor do betão, ou seja, a quase totalidade das emissões que não são possíveis de evitar, constituindo por isso um fator crucial para a neutralidade carbónica do setor do Betão Pronto.

¹¹ Para o cimento, foi definido 2017 como o ano de referência, com base no Roteiro da Indústria Cimenteira nacional para a Neutralidade Carbónica 2050 (2021).



Construction
to Zero

 www.construction2zero.pt