

Do Clínquer ao Concreto: caminhos para a neutralidade de carbono no setor de construção

FÁBIO LUÍS PEDROSO - EDITOR - <https://orcid.org/0000-0002-5848-8710> - (fabio@ibracon.org.br) – IBRACON

RESUMO

O CONCRETO É FUNDAMENTAL PARA A INDUSTRIALIZAÇÃO E URBANIZAÇÃO, SENDO AMPLAMENTE USADO EM MORADIAS E INFRAESTRUTURA. A PRODUÇÃO GLOBAL DE CIMENTO AUMENTOU SIGNIFICATIVAMENTE, ESPECIALMENTE NO SUL GLOBAL, ASSOCIADA AO DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO E SOCIAL. A CONSTRUÇÃO BASEADA EM CONCRETO APOIA 92% DOS OBJETIVOS DE DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL DA ONU. PORÉM, A INDÚSTRIA CIMENTEIRA É RESPONSÁVEL POR 7% DAS EMISSÕES GLOBAIS DE CO₂, PRINCIPALMENTE PELA PRODUÇÃO DE CLÍNQUER. PARA MITIGAR

ESSAS EMISSÕES, A ASSOCIAÇÃO GLOBAL DE CIMENTO E CONCRETO PUBLICOU, EM 2021, SEU ROADMAP TECNOLÓGICO, NO QUAL ESTABELECE ESTRATÉGIAS DE DESCARBONIZAÇÃO, TAIS COMO: SUBSTITUIÇÃO DO CLÍNQUER POR MATERIAIS SUPLEMENTARES, EFICIÊNCIA ENERGÉTICA, USO DE COMBUSTÍVEIS ALTERNATIVOS, TECNOLOGIAS DE CAPTURA E ARMAZENAMENTO DE CARBONO, OTIMIZAÇÃO DA DOSAGEM DO CONCRETO, OTIMIZAÇÃO DO PROJETO E EXECUÇÃO DE ESTRUTURAS DE CONCRETO, ENTRE OUTRAS. O ROADMAP 2021 TRAÇA METAS PARA ZERAR EMISSÕES LÍQUIDAS EM 2050, MAS HÁ DESAFIOS ECONÔMICOS, TÉCNICOS E POLÍTICOS.

PALAVRAS-CHAVE: DESCARBONIZAÇÃO DO CIMENTO, DESMATERIALIZAÇÃO DA CONSTRUÇÃO, EMISSÕES LÍQUIDAS NULAS DE CARBONO, CONCRETOS ECOEFICIENTES.

1. INTRODUÇÃO

O concreto está intrinsecamente ligado à industrialização e urbanização modernas. Ele foi desde a Revolução Industrial empregado na construção de fábricas, estações de trem, canais, estradas, pontes e docas para armazenar e escoar a produção industrial em ascensão. Além disso, começou a ser usado na construção de moradias e

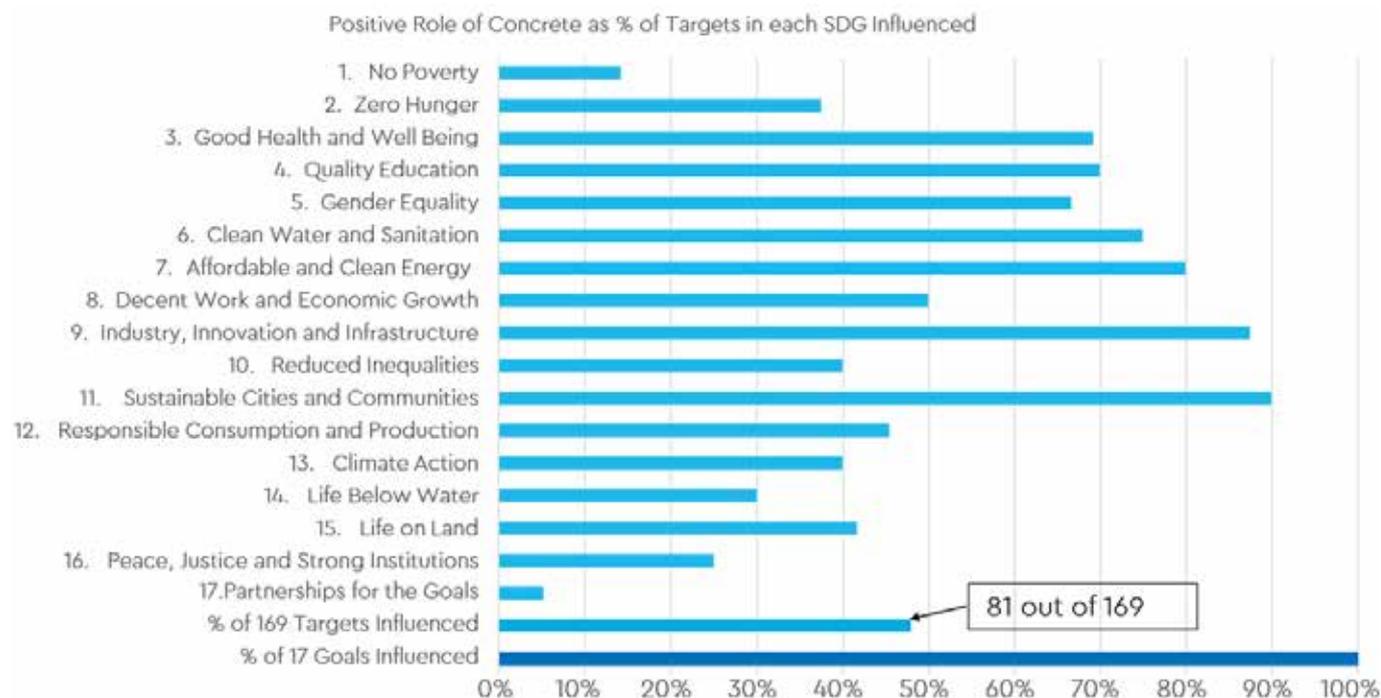


GRÁFICO 1

CONTRIBUIÇÃO POSITIVA DO CONCRETO EM RELAÇÃO AOS OBJETIVOS DO DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL

FONTE: MINSON (2020)

obras que melhoram as condições de vida nas cidades. Isto porque era um material construtivo durável, resistente ao fogo e à água e facilmente produzido com matérias-primas abundantes e bem distribuídas geograficamente.

A produção mundial de cimento cresceu paulatinamente durante os séculos XIX e XX, atingindo um bilhão de toneladas em 1990. Com a entrada da China no comércio mundial, a produção mundial teve um salto vertiginoso, atingindo 4,2 bilhões de toneladas em 2022. Mais de 80% desta produção encontra-se atualmente em países em desenvolvimento no Sul Global (CGR, 2022).

Por isso, o aumento da produção de cimento e concreto é atualmente sinônimo de desenvolvimento econômico e social. O Escritório das Nações Unidas de Serviços para Projetos (UNOPS) credita ao ambiente construído o suporte necessário para se atingir 92% das 167 metas dos 17 Objetivos do Desenvolvimento Sustentável (ODS), por ele prover infraestrutura para distribuição de água e saneamento sanitário, energia e comunicações digitais, transporte e mobilidade urbanos, além de prédios para habitação, saúde, escolas etc. (Gráfico 1)

O relatório do Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (UNEP) "Iniciativa para o Clima e a Construção Sustentável", prevê dois cenários para a produção global de cimento: no de baixa demanda, a produção deve atingir 4,5 bilhões de toneladas em 2050; no cenário de alta demanda, seis bilhões de toneladas em 2050 (Scrivener, John e Gartner, 2016). É uma estimativa conservadora, uma vez que, nos últimos 64 anos, a produção de cimento cresceu 34 vezes, superando em muito o crescimento da população mundial, que cresceu apenas três vezes, ao contrário do que pressupõe o relatório (Gráfico 2).

A ONU estima que a população mundial deve atingir 9,8 bilhões de pessoas, 68% delas vivendo em cidades, de modo que três quartos da infraestrutura que existirá em 2050 será ainda construída.

Já é um fato científico que a industrialização iniciada na metade do século XVIII aumentou a concentração de gases do efeito estufa (GEE), em especial o gás carbônico (CO₂), principalmente em decorrência da queima de combustíveis

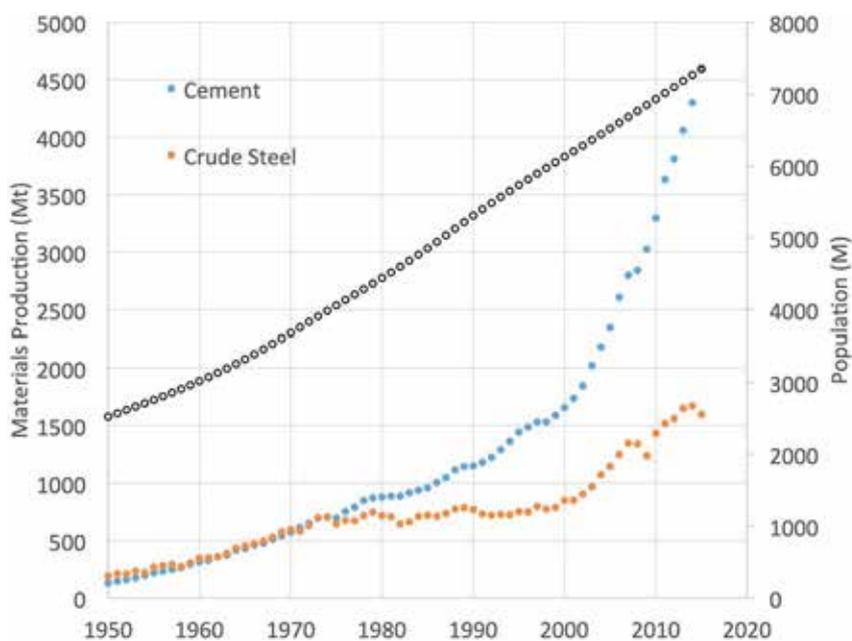


GRÁFICO 2

COMPARAÇÃO DA PRODUÇÃO DE CIMENTO E AÇO COM A POPULAÇÃO

FONTE: SCRIVENER, JOHN E GARTNER (2016)

fósseis. Atualmente, o mundo emite anualmente 55 bilhões de toneladas anuais de GEE (Forster *et al.*, 2024). A projeção da UNEP é que, no cenário corrente de desenvolvimento, ela ultrapasse 60 bilhões de toneladas em 2035. O aquecimento global causado pelo aumento da concentração de gases do efeito estufa na atmosfera altera o equilíbrio climático do planeta, aumentando a frequência e prolongando os eventos climáticos extremos.

Desde 1999, este fato científico é reconhecido pelas próprias cimenteiras reunidas na Iniciativa Cimenteira para a Sustentabilidade (CSI, em inglês), programa setorial que envolvia 24 companhias de cimento, com operações em mais de 100 países, respondendo por cerca de 30% da produção mundial de cimento na época, para lidar com os desafios do desenvolvimento sustentável.

A CSI criou, em 2003, um protocolo para medir e reportar as emissões de dióxido de carbono de seus membros, e lançou um sistema de coleta de dados (GNR, na sigla em inglês: *Getting the Number Right*) sobre o desempenho das plantas de cimento em termos de emissões de CO₂ e consumo de energia, não restrito aos seus membros, mas aberto

a todo o setor cimenteiro. Atualmente 850 plantas de cimento de 60 companhias, distribuídas geograficamente na Europa, América e Ásia, representando aproximadamente 80% da produção anual de cimento, sem considerar a produção chinesa, fornecem dados ao sistema.

As métricas do GNR estão relacionadas às principais rotas tecnológicas propostas pela indústria mundial de cimento para mitigar suas emissões de CO₂, consolidadas no Roadmap Tecnológico da Indústria de Cimento em 2008 e no Roadmap to Net Zero, de 2021. O Roadmap 2021, iniciativa da Associação Global de Cimento e Concreto (GCCA), formada por 50 companhias de cimento e 30 associações do setor cimenteiro e concreto, traça um caminho de implementação de tecnologias nos setores cimenteiro e concreto para zerar suas emissões líquidas de carbono em 2050, atendendo ao chamado do IPCC para limitar o aquecimento global em 1,5° C até o final deste século (Gráfico 3).

Para se manter dentro da meta do IPCC de aumento da temperatura média global em 1,5°, será preciso que haja uma redução das emissões de 7% anualmente a partir de 2030. No entanto, de 2011 a 2021, o crescimento anual das emissões foi de 1,5%.

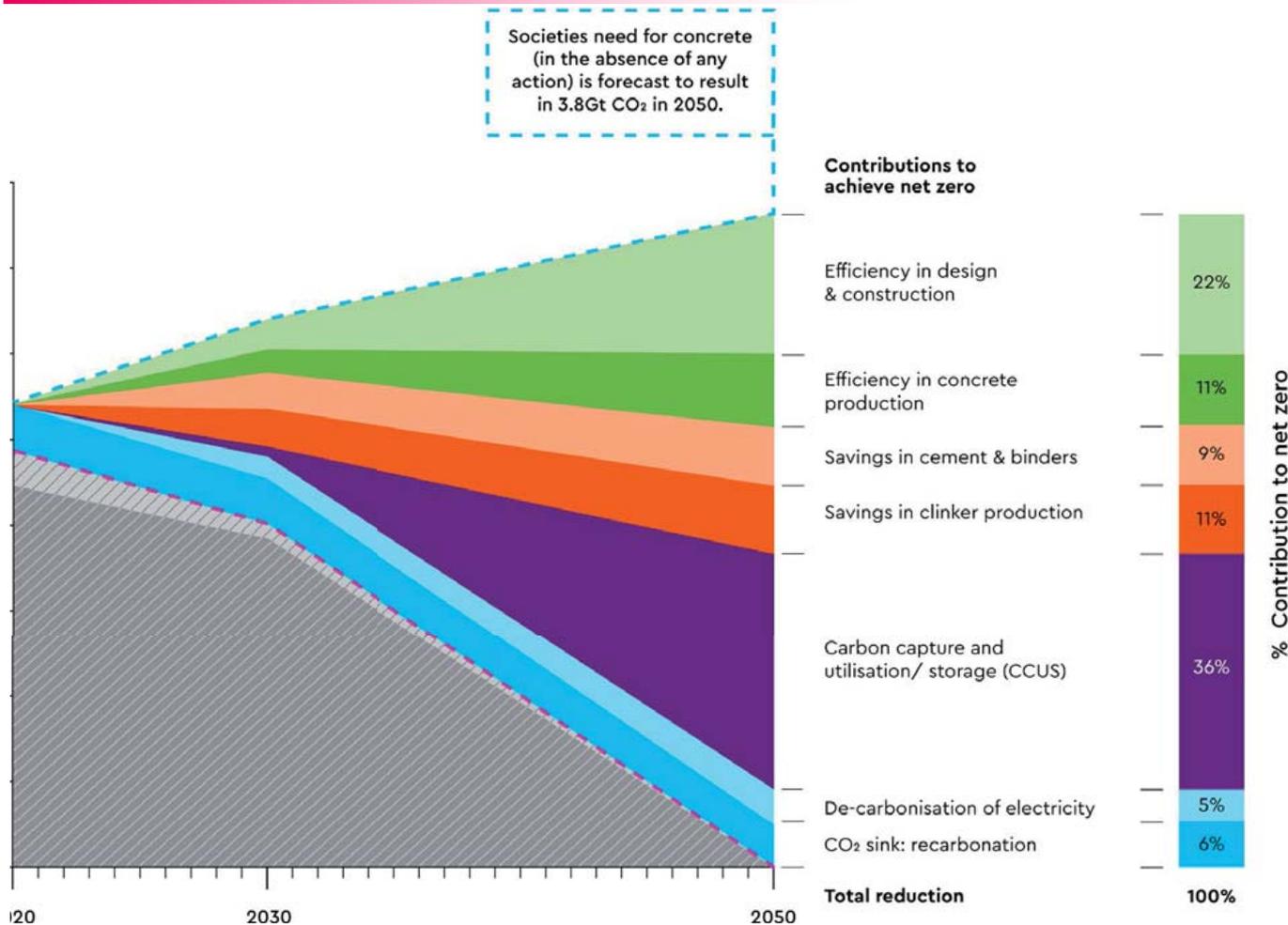


GRÁFICO 3

ESTIMATIVAS DE ABATIMENTO DE CARBONO PELOS SETORES DE CIMENTO E CONCRETO POR ROTAS TECNOLÓGICAS

Fonte: GCCA (2021)

2. ROTAS TECNOLÓGICAS DA DESCARBONIZAÇÃO DO CIMENTO

A quase totalidade das emissões de CO₂ advindas da indústria cimenteira diz respeito ao processo de produção do clínquer, produto da calcinação de calcário e argila a temperaturas acima de 1400 °C no forno. A descarbonatação do calcário no processo e a queima de combustíveis fósseis geram, para cada tonelada de clínquer produzido, cerca de 620 quilogramas de dióxido de carbono, na proporção de 60 para 40, na média mundial (Caldas *et al.*, 2024).

Em razão dessa proporção, a substituição do clínquer é a principal rota tecnológica de mitigação das emissões no setor cimenteiro. A substituição de clínquer por escórias de alto forno e cinzas volantes nos diferentes tipos de cimento vem acontecendo desde a década de 1970, impulsionada principalmente pela crise do petróleo de 1973. Esses materiais cimentícios suplementares (SCM), subprodutos

das indústrias siderúrgica e termelétrica, economizam energia térmica na medida em que dispensam em igual proporção a produção de clínquer pela cimenteira. Eles têm a capacidade de reagir com os produtos da hidratação do cimento, contribuindo para aglomerar os demais componentes do concreto (propriedade pozolânica).

De 1990 a 2020, o fator clínquer caiu, em média, entre os participantes do GNR de 83% para 75%, queda de 10%, com sua substituição pelos SCM. Com isso, as emissões de CO₂ por tonelada de cimento caíram globalmente 16% desde 1990, de 758 kg CO₂/t para 635 kg CO₂/t em 2020. No Brasil, de 1990 a 2022, as emissões específicas de carbono reduziram-se 17%, de 700 kg CO₂/t de cimento para 580 kg CO₂/t.

O uso global de cinza volante e escória de alto forno é, no entanto, limitado pela sua produção anual, disponibilidade regional, qualidade, desempenho técnico, normatização, entre outros fatores.

O montante de escória de alto forno disponível globalmente é cerca de 330 milhões de toneladas por ano, sendo que sua proporção em relação à produção mundial de cimento caiu de 17% em 1980 para 8% em 2014 (SCRIVENER; JOHN; GARTNER, 2016). Segundo esses autores, a tendência é de a produção ficar abaixo deste patamar no longo prazo, devido à substituição das plantas siderúrgicas atuais por fornos elétricos mais modernos de arco, que não produzem escórias.

Por sua vez, a produção anual de cinza volante gira em torno de 5% da quantidade de calcário consumida na produção de clínquer (Damtoft *et al.*, 2008). A tendência é também de queda da produção pela substituição de usinas termelétricas por usinas de energia renovável no médio e longo prazo.

Para que esta rota tecnológica cumpra o potencial estimado de abatimento de 9% das emissões previstas para 2050

(Gráfico 3), será necessário usar novos SCM, como a argila caulinitica, com jazidas abundantes espalhadas pela natureza. Elas desenvolvem uma boa atividade pozolânica quando calcinadas a temperaturas entre 500 °C e 800 °C, consumindo menos energia elétrica e térmica e, conseqüentemente, emitindo menos CO₂ por tonelada em relação ao clínquer.

Atualmente, existem plantas em escala comercial em várias partes do mundo, como Suíça, Colômbia e Taiwan, produzindo 13 milhões de toneladas de argila calcinada. Esta produção deve complementar o uso de cinza volante e escória de alto forno em regiões onde sua produção está em queda.

Por outro lado, a adição mais disponível na natureza para substituir o clínquer é o calcário finamente moído, que dispensa calcinação. Ele cumpre duas funções complementares no concreto: reage com os produtos de hidratação do cimento, como os demais SCM, caracterizando-se como ligante; e ele ocupa os vazios entre os demais componentes do concreto, contribuindo com sua trabalhabilidade e impermeabilidade, exercendo papel de filer.

As práticas de mercado de cimento ensacado, com enorme variação nas taxas de substituição de clínquer por filer calcário, apontam para a potencialidade desta

estratégia (SCRIVENER; JOHN; GARTNER, 2016). No entanto, a disseminação dessa substituição deve vir respaldada por mais estudos científicos e pela atualização normativa baseada nesses estudos, bem como pela mudança da cultura construtiva de cada país.

Estudos recentes têm explorado os efeitos sinérgicos das combinações otimizadas de argilas calcinadas e do calcário como materiais cimentícios suplementares. Esses estudos têm estabelecido que combinações na ordem de 50% de substituição do clínquer são capazes de manter as propriedades de desempenho desses cimentos em níveis similares aos cimentos atuais em uso. Levando esses estudos em conta, ECRA/CSI (2017, p. 124) estimam uma redução de até 380 MJ no consumo específico de energia térmica, uma redução de até 7 kWh no consumo específico de energia elétrica e uma redução de até 184 kg de CO₂ emitido por tonelada de cimento produzido (Tabela 1).

A crise do petróleo de 1973 impulsionou também a adoção das mais modernas tecnologias para aumentar a eficiência energética dos fornos de cimento. A substituição do processo de via úmida pelo processo de via seca foi intensificada a partir de 1990. Na via seca, a farinha de matérias-primas, úmida, passa por pré-aquecedores, uma série

de ciclones verticais formados pelos gases quentes exauridos dos fornos, antes de entrar no forno, o que faz com que as reações químicas de clínquerização ocorram mais rapidamente e com menor consumo energético. De 1990 a 2020, houve uma redução de 18% nas emissões específicas de CO₂ no setor, que foi de 4240 MJ/t de clínquer para 3460 MJ/t, pela adoção dessa estratégia.

Houve também uma redução de 14% no consumo de energia elétrica no setor cimenteiro mundial, com a introdução de moinhos verticais de rolos ou moinhos giratórios. De 1990 a 2020, o consumo elétrico no setor caiu de 119k Wh/t de cimento para 102 kWh/t. Com a implantação de tecnologias de captura, uso e estocagem de carbono no setor, o consumo elétrico deve aumentar, o que tornará a indústria cimenteira mais dependente da transição do setor elétrico para energias renováveis, para garantir emissões líquidas nulas de carbono.

A indústria de cimento tem enfatizado a rota da substituição de combustíveis fósseis por combustíveis alternativos, como pneus, resíduos domésticos e industriais, e biomassa. Ela teve início nos anos 1980 e continua aumentando sua participação na matriz energética da indústria cimenteira, por trazer redução de custos de produção e de emissões diretas e indiretas de gases do efeito estufa.

TABELA 1

ESTIMATIVAS DAS TAXAS DE SUBSTITUIÇÃO DE CLÍNQUER POR SCM E SEU IMPACTO NAS VARIAÇÕES DE CONSUMO ESPECÍFICO DE ENERGIA TÉRMICA E ELÉTRICA, E DE INTENSIDADE ESPECÍFICA DE EMISSÕES DE CO₂ ATÉ 2050

Adições	Taxas de substituição (%)	Varição máxima no consumo específico de energia térmica (MJ/t)	Varição máxima no consumo específico de energia elétrica (kWh/t)	Redução máxima na intensidade específica de CO ₂ (kg/t)	Varição máxima no consumo específico de energia térmica (%)*	Varição máxima no consumo de energia elétrica (%)**	Potencial máximo de redução na intensidade específica de CO ₂ (%)+**
Escória granulada de alto forno	30 a 70*	- 1590*	+ 10*	- 385*	-47	+10	-46
Cinza volante	25 a 35**	- 360**	- 15**	- 98**	-11	-14	-12
Pozolanas naturais	15 a 35***	- 360***	- 3***	- 91,7***	-11	-1	-11
Argila calcinada	15 a 35****	+150****	- 5****	- 75****	+4	-5	-9
Argila calcinada + calcário	50****	-380****	- 7****	- 184****	-11	-7	-22
Calcário + outros SCM	0 a 10***** 25*****	- 360*****	- 5*****	- 90*****	-11	-5	-11

Notas: *ECRA/CSI (2017, p. 109); ** ECRA/CSI (2017, p. 118); *** ECRA/CSI (2017, p. 121); **** ECRA/CSI (2017, p. 124); ***** ECRA/CSI (2017, p. 127);

+ESTIMATIVA A PARTIR DOS DADOS RESPECTIVOS DA LINHA E DE ECRA/CSI (2017, pp. 8-10) (NÃO INCLUI IMPACTO DA ADIÇÃO DE GESSO NO CIMENTO NO CÁLCULO); **ESTIMATIVA A PARTIR DOS DADOS RESPECTIVOS DA LINHA E DE ECRA/CSI (2017, pp. 11-13); ***ESTIMATIVA A PARTIR DOS DADOS RESPECTIVOS DA LINHA E DE SCRIVENER *et al.* (2016, p. 4) (NÃO INCLUI IMPACTO DA ADIÇÃO DE GESSO NO CIMENTO NO CÁLCULO).

Fonte: PEDROSO (2018)

O uso de combustíveis alternativos fez o consumo global por combustíveis fósseis se reduzir em 22% desde 1990 no setor cimenteiro (GNR). O Roadmap 2021 prediz que o uso de combustíveis alternativos nos fornos de cimento deve sair de um patamar médio de 6% em 2020 para 22% em 2030 e 43% em 2050. O patamar de 22% de substituição já foi alcançado pelas indústrias cimenteiras do GNR em 2022, o que demonstra a viabilidade técnica e econômica da previsão. Esta rota deve contribuir, juntamente com ganhos residuais em eficiência energética nas plantas de cimento e adição de matérias-primas como o filler calcário, com 11% de abatimento das emissões em 2050.

Todavia, persistem atualmente barreiras econômicas, técnicas e sociais para maior uso dos combustíveis alternativos nas plantas de cimento. No Brasil, por exemplo, que gera anualmente cerca de 106 milhões de toneladas de lixo, apenas 25 milhões são reaproveitados (reciclagem, compostagem e agregados reciclados de construção e demolição) e 40 milhões tem destinação adequada (aterros sanitários). O setor cimenteiro coprocessa atualmente 3,25 milhões de toneladas de resíduos, o que representa uma média de substituição

de 32%, patamar abaixo de países como Espanha (40%), França (56%), Estados Unidos (56%), Alemanha (76%) e Áustria (85%), ente outros (Gráfico 4). Em 2050, a indústria cimenteira nacional espera substituir 55% de combustíveis fósseis. Para isso, prevê aumentar o uso de biomassa em até 11% e de resíduos sólidos urbanos em até 35%. Os pneus inservíveis continuarão no patamar limite de 9% das substituições, tendo atingido sua disponibilidade.

A soma das contribuições de uso de combustíveis alternativos, de substituição de clínquer por materiais cimentícios suplementares e matérias-primas descarbonatadas, e de eficiência térmica e elétrica deve perfazer, segundo o Roadmap 2021, 20% de abatimento das emissões previstas em 2050, cerca de 760 milhões de toneladas de carbono, das 3,9 bilhões de toneladas estimadas de serem abatidas em 2050 (Gráfico 3). Uma contribuição marginal para esta meta deve vir da pesquisa, desenvolvimento e inovação de novos ligantes e do uso de energias renováveis nas plantas de cimento.

O Roadmap Net Zero 2050 do Brasil faz uma previsão mais otimista para a contribuição do setor cimenteiro nacional para se chegar em emissões líquidas nulas

em 2050 no segmento construtivo: 10% de redução proveniente da produção de clínquer (por meio de SCMs) e 21% de redução proveniente da produção de cimento (por meio de combustíveis alternativos, adição de filler calcário e eficiência energética), partindo das 40 milhões de toneladas de carbono emitidas em 2020 e estimando 65 milhões de toneladas que seriam emitidas em 2050, caso não se adote as rotas tecnológicas do mapeamento brasileiro (Gráfico 5).

Em nível mundial, o mapeamento tecnológico mais recente da indústria cimenteira delega 80% do abatimento previsto para se atingir emissões líquidas nulas em 2050 ao setor de produção e uso do concreto, e à implementação de tecnologias de captura, uso e armazenamento de carbono.

A captura e estocagem de carbono (CCS) consiste no sequestro do CO₂ à medida que é emitido na planta, na sua liquefação e transporte por meio de dutos, e, por fim, no seu armazenamento no subsolo, como em poços vazios de petróleo. No momento existem 100 projetos anunciados, dos quais 33 são esperados estarem finalizados até 2030. Nenhum deles no Brasil.



GRÁFICO 4

TAXA DE SUBSTITUIÇÃO DE COMBUSTÍVEIS FÓSSEIS POR COMBUSTÍVEIS ALTERNATIVOS

FONTE: GCCA (2021)

Contribuições para o Net Zero por categoria até 2050

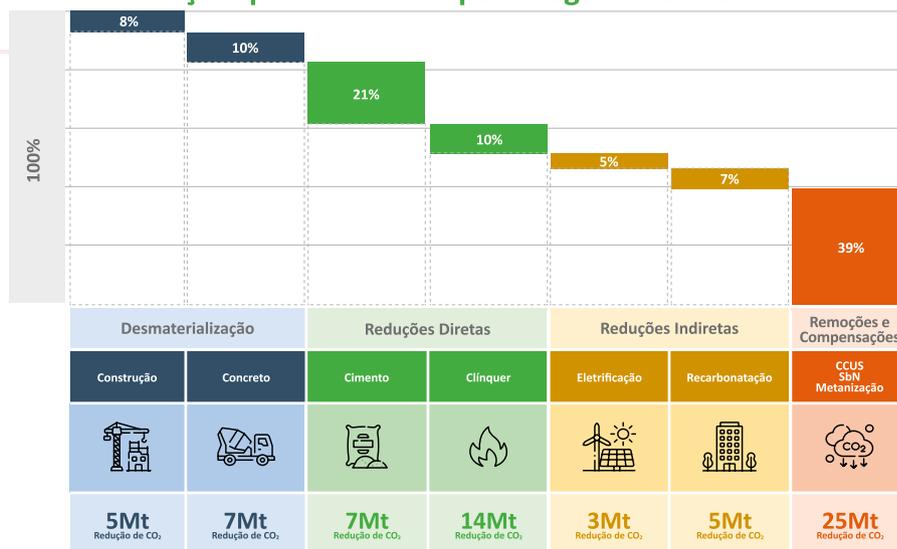


GRÁFICO 5

PARTICIPAÇÃO PERCENTUAL DE ROTAS TECNOLÓGICAS PARA ATINGIR EMISSÕES LÍQUIDAS NULAS EM 2050 NO ROADMAP BRASILEIRO

FONTE: ROADMAP DO NET ZERO - BRASIL

Por sua vez, a estratégia de captura e uso do carbono (CCU) é uma alternativa economicamente mais interessante para a indústria cimenteira, pois prescinde de um ambiente regulatório favorável econômica e tecnicamente em termos de logística de transporte e armazenamento e de mercado de carbono, e resulta na fabricação de insumos com valores de mercado, o que pode compensar seu custo de adoção e operação. Existem, atualmente, 58 projetos de CCU em estágio de implementação no mundo, 31 deles sendo projetos de escala completa, que devem contribuir, quando finalizados, para a captura de 25 milhões de toneladas de CO₂, bem abaixo da meta de 840 milhões de toneladas para 2050 para CCUS (Gráfico 3).

Um uso interessante para o gás carbônico capturado é a cura produtos pré-fabricados cimentícios de concreto simples, sem armadura. Estudos em andamento têm mostrado ganhos de resistência mecânica iniciais comparáveis à cura convencional do concreto (com vapor), com a vantagem de fixação do carbono capturado no produto cimentício. Faltam, porém, estimativas de abatimento de carbono para esta tecnologia.

Adicionalmente, o Plano Clima do Brasil prevê que a indústria cimenteira possa fazer uso do mercado de carbono regulado, comprando certificados do setor florestal e agropecuário, enquanto as tecnologias de CCUS não estejam amadurecidas.

3. ROTAS TECNOLÓGICAS DA DESCARBONIZAÇÃO DA CONSTRUÇÃO

Em termos de produção de concreto, existem alguns caminhos promissores. Em países em que esta produção é predominantemente feita em canteiros de obras, como a Índia e o Brasil, promover o maior uso de concreto dosado em central pode trazer economia em termos de emissões de carbono, pois esses concretos usam adições, melhor granulometria de agregados e dosagem do concreto adequada para a resistência mecânica especificada em projeto, fatores que favorecem o menor uso de cimento no concreto.

A quantidade de ligante no concreto pode ser reduzida ao seu limite mínimo por meio de técnicas de empacotamento e dispersão de partículas. O empacotamento visa minimizar os vazios entre os componentes do concreto por meio de um estudo

granulométrico refinado. A dispersão de partículas usa aditivos químicos que promovem a dispersão dos componentes no concreto fresco e, assim, garante sua trabalhabilidade com menos água. As duas técnicas combinadas são capazes de reduzir a quantidade de cimento necessária para ligar os demais componentes, produzindo um concreto de uma determinada classe de resistência com menor impacto ambiental (Veja artigo sobre o concreto Quantum nesta edição). Uma questão em aberto é quanto à durabilidade desses concretos, pois se sabe que existe uma correlação positiva entre a quantidade de cimento e a durabilidade do concreto.

Num estudo de caso publicado em periódico internacional, Belizario-Silva *et al.* (2021) demonstraram que a escolha entre o concreto convencional e um concreto inovador desenvolvido pelos autores em condições laboratoriais, com alto teor de fíler em substituição ao cimento e baixo teor de água, foi o principal determinante na variação da pegada de carbono de uma estrutura pré-fabricada, variando entre 124 tCO_{2e} e 324 tCO_{2e}, limites mínimo do concreto inovador e limite máximo do concreto convencional, respectivamente, em função do traço escolhido (Figura 1).

Para o cenário no qual foi usado apenas o concreto convencional, a pegada de carbono da estrutura variou de 162 tCO_{2e} e 324 tCO_{2e}. O principal fator decisivo neste caso para essa variação foi a escolha do tipo de laje do projeto estrutural: a laje

“pi” apresentou menor pegada de carbono (220 tCO_{2e}), sobretudo porque requer menor volume de concreto, seguida pelas lajes alveolares de 40 cm (244 tCO_{2e}) e de 16 cm (267 tCO_{2e}). O segundo fator mais importante nesse cenário foi a pegada de carbono do cimento composto, que variou em função da variação do teor de clínquer desses cimentos (Figura 2).

Os dados acima referem-se ao concreto dosado em central. Todavia, em países em que os cimentos ensacados perfazem a maior demanda e trazem uma quantidade alta de materiais cimentícios suplementares, como no Brasil, onde 60% do mercado de cimento é ensacado, pode ser também interessante manter este mercado para construções que demandem estruturas com baixa resistência mecânica, adotadas na autoconstrução.

A opção pelo concreto dosado em central ou concreto rodado em obra com cimento composto com alto teor de materiais cimentícios suplementares deverá ser informada, para cada caso, por meio de Avaliações do Ciclo de Vida dos produtos usados na obra em referência.

O GNR não se aplica ainda à produção de concreto e está em processo de adaptação para agregar os dados das associações de empresas de concretagem em nível mundial. Apesar disso, o Roadmap 2021 faz a previsão de que, globalmente, a otimização da produção do concreto deve levar à redução do conteúdo de clínquer nele em 5% em 2030 e em 14% em 2050

Resultados da análise de sensibilidade para o concreto convencional ou inovador (HFLW)

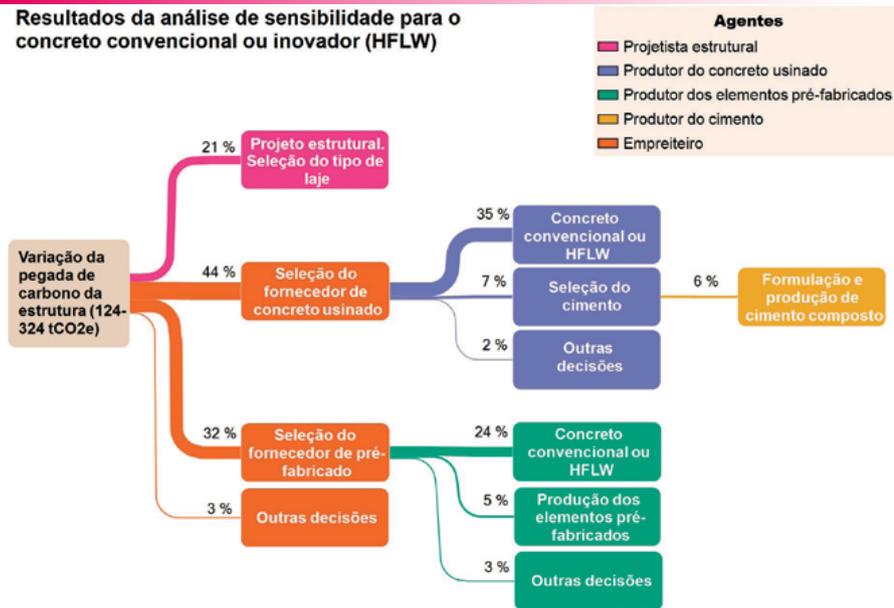


FIGURA 1

PORCENTAGENS CONTRIBUTIVAS DOS FATORES DETERMINANTES PARA A VARIÇÃO DA PEGADA DE CARBONO DA ESTRUTURA EM ANÁLISE PARA O CENÁRIO QUE CONSIDERA O USO DE CONCRETO CONVENCIONAL OU INOVADOR

FONTE: BELIZARIO-SILVA *et al.* (2021)

para mitigar emissões de CO₂ por metro cúbico de concreto aplicado (Veja artigo na edição sobre ACV de concreto armado).

Por sua vez, o concreto de alta resistência usa menos água e tem uma melhor distribuição granulométrica, sendo menos poroso e permeável a agentes agressivos, como o próprio gás carbônico, cloretos e sulfatos, que ingressando no concreto atacam a película passivadora em redor das armaduras, que, por conseguinte iniciam processo corrosivo. Sendo assim, concretos de alta resistência, como o concreto de ultra-alto desempenho, requer menos manutenções periódicas e têm maior durabilidade; consequentemente, mantêm-se em serviço por muito mais tempo, preservando recursos materiais e energéticos.

A maior adoção de agregados reciclados de construção e demolição pode também contribuir para abater emissões no setor, uma vez que os agregados reciclados são usados em substituição às areias e britas naturais, que não precisarão ser explorados, processados e transportados. A Pesquisa Setorial 2024 da Associação Brasileira para a Reciclagem de Resíduos da Construção Civil (Abrecon) estima que apenas 25% dos 106 milhões de toneladas

em relação a 2020, o que deve contribuir para um abatimento nas emissões de 430 milhões de toneladas em 2050, isto é, 11% de redução (Gráfico 3).

Já, pelo lado da demanda por concreto, a descarbonização deve acontecer por meio da desmaterialização dos projetos estruturais e da maior eficiência executiva.

Um caso de desmaterialização, processo de projetar e construir uma estrutura com menos insumos e energia, e consequentemente, com menos desperdício e com a possibilidade de reaproveitamento de suas peças, sem comprometer seus requisitos de segurança, funcionalidade e durabilidade, foi exposto acima pelo estudo de Belizário-Silva *et al.* (Figura 2). Nela o projetista conta com opções de diferentes tipos de lajes, podendo optar pela laje com menor impacto ambiental. Outra rota de desmaterialização da estrutura de concreto é a otimização topológica, que consiste na busca pela melhor distribuição do concreto no projeto de estrutura, removendo material de regiões menos solicitadas, por meio do uso de software de modelagem numérica que promove o melhor balanceamento entre consumo de materiais e desempenho estrutural (Veja artigos sobre otimização topológica nesta edição).

Aumentar a resistência do concreto com maior consumo de cimento em sua produção pode, à primeira vista, parecer um

caminho contraproducente. Mas, estudos têm apontado que o aumento da resistência mecânica de pilares diminui consideravelmente sua seção transversal, o que leva ao menor consumo de concreto e aço na sua fabricação, contribuindo positivamente

Resultados da análise de sensibilidade para o concreto convencional

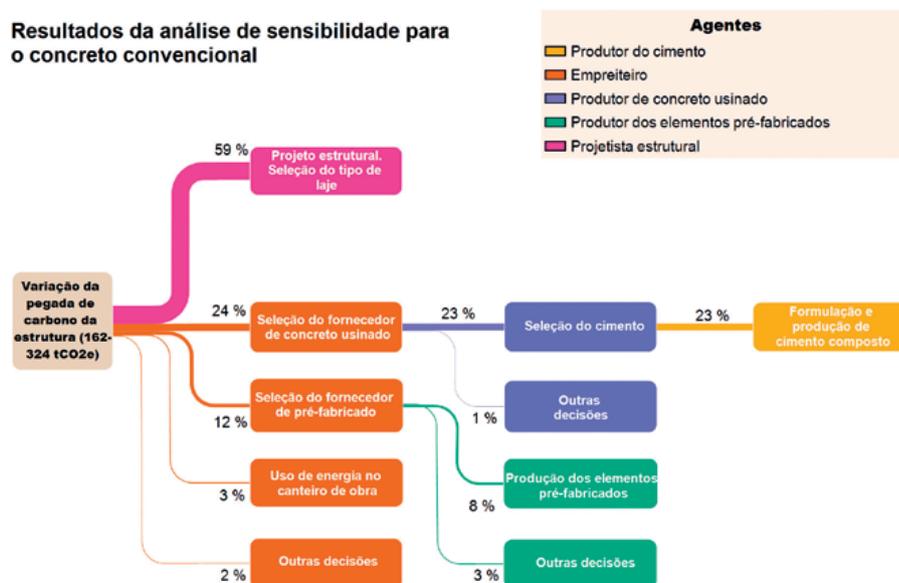


FIGURA 2

PERCENTAGENS CONTRIBUTIVAS DOS FATORES DETERMINANTES PARA VARIÇÃO DA PEGADA DE CARBONO DA ESTRUTURA ANALISADA PARA O CENÁRIO QUE CONSIDERA APENAS O CONCRETO CONVENCIONAL

FONTE: BELIZARIO-SILVA *et al.* (2021)

de entulho por ano são reciclados. Segundo a pesquisa, apenas 16 milhões de metros cúbicos de agregados reciclados foram comercializados em 2023, diante do potencial estimado de 24 milhões. Adicionalmente, os agregados reciclados podem fixar o CO₂ capturado por meio da carbonatação e ter suas propriedades mecânicas melhoradas antes de seu uso no concreto.

O principal obstáculo ao maior uso do agregado reciclado não é técnico. Pesquisas conduzidas em universidades brasileiras têm demonstrado a viabilidade técnica de uso de 100% de agregado reciclado em concreto não estrutural (base de pavimentação, calçadas e aterros) e a norma brasileira faculta a substituição de até 20% do agregado natural por reciclado de concreto para estruturas de até 20 MPa em ambientes de média agressividade (classes I e II).

No entanto, o desconhecimento por parte de engenheiros e construtoras e a falta de políticas públicas fomentadoras do maior uso de reciclados na construção têm contribuído para sua baixa utilização no Brasil.

No que concerne ao abatimento de carbono com uso de agregados reciclados, como esses aumentam, no geral, o consumo de cimento, se faz necessário avaliar o balanço final entre esses dois fatores.

De qualquer modo, o uso de agregados reciclados é importante para reduzir a demanda por materiais naturais.

O Roadmap 2021 prevê que o potencial global de redução das emissões de carbono por meio de projeto e construção ecologicamente eficientes deve ser de 7% em 2030 e 22% em 2050, quando se deve evitar emissões da ordem de 840 milhões de toneladas (Gráfico 3).

Ele também estima que a recarbonatação do concreto possa contribuir com 6% de abatimento das emissões de carbono em 2050 (cerca de 240 milhões de toneladas).

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O setor global de cimento e concreto apresenta um perfil de emissões desafiador, devido à sua dependência do processo de calcinação do clínquer e ao uso intensivo de combustíveis fósseis. As rotas tecnológicas delineadas no último roadmap da GCCA fornecem um arcabouço estratégico para a descarbonização, contemplando: redução do teor de clínquer, adoção de combustíveis alternativos e renováveis, desenvolvimento de tecnologias de captura, utilização e armazenamento de carbono (CCUS), otimização da dosagem do concreto, industrialização e otimização do

projeto e execução da estrutura de concreto.

Todavia, os dados disponíveis indicam que a implementação dessas soluções ainda está em estágio inicial, com lacunas significativas em termos de maturidade tecnológica, custo-efetividade e disponibilidade de infraestrutura. Em particular, a expansão da capacidade de CCUS e a contabilidade ambiental relativa à produção e consumo do concreto permanecem como gargalos críticos para o atingimento das metas de emissões líquidas zero.

A integração de tecnologias emergentes requer investimentos robustos em P&D, além da criação de um ambiente regulatório que favoreça a inovação e a adoção em escala industrial. A harmonização de padrões e métricas para monitoramento e reporte de emissões será essencial para garantir a transparência e a comparabilidade dos resultados.

Portanto, para a concretização das metas do setor, é imprescindível um esforço sistêmico que articule a inovação tecnológica, políticas públicas eficazes, incentivos econômicos e cooperação internacional, assegurando o desenvolvimento sustentável da cadeia produtiva de cimento e concreto, sem comprometer a competitividade global do setor. 🌱

▶ REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Belizario-Silva *et al.* Stakeholder influence on global warming potencial of reinforce concrete estrutura. *Journal of Building Engineering*, Vol. 44, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.102979>
- [2] CALDAS, L.; SILVA, L.; SIQUEIRA, T.; TOLEDO FILHO, R. Descarbonização e Política Industrial: Desafios para a Cadeia do Cimento. *Decarbonization & Industrial Policy Working Paper DIP-BR05*, 2024.
- [3] DAMTOFT, J.S.; LUKASIK, J.; HERFORT, D.; SORRENTINO, D.; GARTNER, E.M. Sustainable development and climate change initiatives. *Cement and Concrete Research*, [S.l.], n. 38, pp. 115-127, 2008. doi:10.1016/j.comconres.2007.09.008
- [4] EUROPEAN CEMENT RESEARCH ACADEMY e CEMENT SUSTAINABILITY INICIATIVE. *Development of state of the art-techniques in cement manufacturing: trying to look ahead*. Duesseldorf, Geneva: ECRA/CSI, 2017. Disponível em: <<http://www.wbcdcement.org/technology>>. Acesso em: 20 dez. 2017.
- [5] Forster, Piers *et al.* Indicators of Global Climate Change: anual update of key indicators of the state of the climate system and human influence. *Earth System Science Data*, 2025, Vol. 17, N. 6 (<https://doi.org/10.5194/essd-17-2641-2025>)
- [6] Global Cement and Concrete Association: *Concrete Future – GCCA 2050 Cement and Concrete Industry Roadmap for Net Zero Concrete (2020)*. <https://gccassociation.org/concretefuture/>
- [7] Global Cement and Concrete Association. *Concrete Future: Net Zero Progress Report 2024/202*.
- [8] Global Cement and Concrete Association. *GNR 2.0 – GCCA in Numbers*. Retrieved August 03, 2023 from <https://gccassociation.org/sustainability-innovation/gnr-gcca-in-numbers/>
- [9] *Global Cement Report*. International Cement Review: 14th edition, November 2022.
- [10] Minson, A: *The UN Sustainable Development Goals and Concrete*. In: *Proc. fib Symposium 2020, Concrete Structures for Resilient Society* (pp. 2237–2244). Shanghai, China (2020)
- [11] PEDROSO, F.L. *Perspectivas de valor e desenvolvimento tecnológico e científico do cimento: motivações passadas, presentes e futuras*. 2018. 305 p. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas. Departamento de Filosofia, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2018
- [12] SCRIVENER, K. L.; JOHN, V. M.; GARTNER, E. M. *Eco-efficient cements: potential, economically viable solutions for a low-CO₂, cement-based materials industry*. Paris: United Nations Environment Programme (UNEP), 2016