



Novos Cadernos NAEA

v. 26, n. 2 • maio-ago. 2023 • ISSN 1516-6481/2179-7536



# PRODUÇÃO DE CIMENTOS DE BAIXO IMPACTO AMBIENTAL: PERSPECTIVAS PARA A REGIÃO AMAZÔNICA

## PRODUCTION OF LOW ENVIRONMENTAL IMPACT CEMENTS: PROSPECTS FOR THE AMAZON REGION

**Nállyton Tiago de Sales Braga**  

Universidade Federal do Pará (UFPA), Belém, PA, Brasil

**Euler Santos Arruda Junior**  

Universidade Federal do Pará (UFPA), Belém, PA, Brasil

**Márcio Santos Barata**  

Universidade Federal do Pará (UFPA), Belém, PA, Brasil

## RESUMO

A produção de cimentos com menor pegada ecológica é de extrema relevância como medida mitigadora da emissão de gases poluentes pela indústria de construção civil. Desse modo, este estudo tem como objetivo discutir o uso de argila caulínica e calcário, matérias-primas amplamente disponíveis na região amazônica, e que apresentam alto potencial para produção de cimentos de elevado desempenho, menor consumo energético e baixa emissão de gás carbônico. Além dos parâmetros operacionais que devem ser levados em consideração para a produção e comercialização de cimentos de baixo carbono, como as particularidades dos insumos da região, o impacto sobre a indústria e as questões ambientais envolvidas na extração de tais matérias-primas, há o desafio de produzir em coerência com as demandas do mercado consumidor, em especial o segmento informal ou de autoconstrução, que responde por aproximadamente 40% de todo o cimento consumido no planeta, e para quem cimentos de elevado desempenho não apresentam interesse econômico.

**Palavras-chave:** cimentos de baixo carbono; argila caulínica; calcário; Amazônia; cimento LC<sup>3</sup>.

## ABSTRACT

The production of cement with a smaller environmental footprint is an extremely important measure to reduce the emission of polluting gases by the construction industry. Therefore, this study aims to discuss the potential use of kaolinite clay and limestone, raw materials that are widely available in the Amazon region and have a high potential to produce high-performance cements with lower energy consumption and lower carbon dioxide emissions. In addition to the operational parameters that must be taken into account for the production and sale of low-carbon cements, such as the characteristics of the raw materials in the region, the impact on the industry and the environmental issues associated with the extraction of these materials, the challenge is to produce according to the requirements of the market, specially the informal consumer market of self-build, which represents about 40% of total cement consumption on the planet and for which high-performance cements are not of economic interest.

**Keywords:** low carbon cements; kaolinite clay; limestone; Amazon; LC<sup>3</sup> cement.

## 1 INTRODUÇÃO

O desenvolvimento e o progresso, especialmente em economias emergentes, são refletidos por avanços na indústria de construção civil e no mercado de obras como um todo. Atrelado a isso, popularizam-se severos processos de gentrificação e especulação imobiliária, impulsionados especialmente por Planos Econômicos e Programas Governamentais Desenvolvimentistas, que atuam sob a ótica de ordenamento territorial da ocupação do solo (TOPALOV, 1984; BRAGA; GOUVEIA, 2020).

Nesse sentido, a perspectiva de crescimento populacional e expansão das cidades, associada à valorização especulativa de núcleos urbanos centrais com acesso a bens e serviços e a migração de populações vulneráveis para regiões metropolitanas, pressiona lideranças políticas para a criação de projetos e programas voltados à execução de obras de sanitização, infraestrutura e moradia que, por sua vez, aumentam a demanda por materiais à base de cimento, como concretos e argamassas. Cresce, desse modo, conforme as particularidades de planejamento urbano de cada região, a demanda por matérias-primas para suprir a cadeia construtiva: em 2020, por exemplo, o consumo de agregados naturais graúdos e miúdos do setor foi superior a 48 bilhões de toneladas em todo o planeta, e o consumo de cimento, o principal componente dessa indústria – e o material industrializado mais utilizado em massa no mundo, foi de aproximadamente 4 bilhões de toneladas (BRITO; KURDA, 2021).

Como resultado desse cenário, a indústria de cimento apresenta elevada demanda energética e de uso de recursos naturais não renováveis, bem como a maior parcela total de emissões industriais diretas de dióxido de carbono (UWASU; HARA; YABAR, 2014): o material chega a representar 8% das emissões globais antropogênicas de gás carbônico, e em torno de 90% do total de CO<sub>2</sub> gerado pela indústria de construção e lançado na atmosfera, especialmente através da produção do clínquer, que é o principal componente do insumo e o que confere às matrizes cimentícias as principais propriedades mecânicas (HABERT; LACAILLERIE; ROUSSEL, 2011; OLIVIER *et al.*, 2015; MATOS; FOIATO; PRUDÊNCIO JÚNIOR, 2019).

Em 2016, países emergentes, dentre os quais China, Índia, Rússia, África do Sul e Brasil, foram responsáveis por 81% do total da produção mundial de cimento, enquanto os países industrializados, cujo foco é a manutenção de infraestruturas existentes, responderam por apenas 19% (CEMBUREAU, 2017). A expectativa de crescimento global da indústria do cimento é de 12

a 23% até 2050 em relação ao nível atual de produção, o que fará com que a fabricação desse insumo seja responsável por aproximadamente 11 a 15% das emissões globais antropogênicas em aproximadamente 25 anos (IEA, 2018).

Nesse contexto, e tendo como referência atingir as guias para Produção Sustentável de Componentes de Concreto definidas na Conferência do Clima de Paris de 2015, o Programa Ambiental das Nações Unidas para Construção Sustentável e Iniciativa Climática (UNEP – SBCI) estabeleceu, naquele ano, a organização de um grupo técnico para estudar práticas e tecnologias que pudessem reduzir as emissões de  $CO_2$  e otimizar a eficiência dos sistemas e materiais nas cadeias de produção da construção (UN ENVIRONMENT *et al.*, 2018).

As medidas teriam como objetivo não somente limitar a emissão de gases poluentes provenientes da produção e consumo do cimento e seus componentes – no qual se estima que sejam gerados em torno de 840 kg de  $CO_2$  para cada tonelada de clínquer produzido (UN ENVIRONMENT *et al.*, 2018), mas também possibilitar a utilização de materiais alternativos e resíduos de outros segmentos da indústria com potencial químico para atuar em determinado nível de substituição dos componentes cimentícios tradicionais, sem comprometer a aplicabilidade e viabilidade econômica de concretos e argamassas em escala industrial e no mercado como um todo.

UN Environment *et al.* (2018) destacam parâmetros que podem ser adotados como diretrizes de impacto ambiental e emissão de gases poluentes, sejam: combustíveis (relacionando-se a transporte e queima de materiais); eficiência energética de cada processo da teia de produção e consumo de insumos; redução do consumo de clínquer; e captura e armazenamento de carbono. Orsini e Marrone (2019) destacam também diversos aspectos que podem ser considerados para o desenvolvimento de técnicas de baixa emissão de carbono, como o uso de materiais alternativos, recicláveis, resíduos e rejeitos; valorização do uso de materiais disponíveis a nível local e regional; inovações no processo de produção; uso de fontes de energia renováveis; aumento de performance; e aplicação adequada dos produtos.

Diversos estudos abordam ainda a preocupação em mitigar impactos ambientais ligados ao desperdício de materiais pela aplicação inadequada: Miller *et al.* 2018, por exemplo, afirmam que se houvesse 15% menos desperdício de materiais cimentícios por meio da industrialização da produção, haveria potencial redução de até 530 Mton de  $CO_2$  lançados na atmosfera até o ano de 2050, marco do plano de objetivos estabelecidos

pelo Programa Ambiental das Nações Unidas para Construção Sustentável e Iniciativa Climática.

Ressalta-se que tais taxas de desperdício ocorrem porque a construção civil, especialmente em regiões em desenvolvimento, está fortemente conectada a mercados informais ou de autoconstrução (obras domésticas, pequenas reformas, locais onde concretos e argamassas normalmente são produzidos sem adequado controle tecnológico), onde falhas de planejamento, armazenamento ou mesmo no transporte de materiais resultam, principalmente no caso do cimento, em perdas médias de 45%, que podem chegar a até 2,5 vezes a quantidade realmente necessária do material para a execução das atividades no canteiro de obras (UN ENVIRONMENT *et al.*, 2018).

Reis *et al.* (2021) destacam 3 paradigmas que poderiam gerar cenários distintos para a redução de emissão de gases poluentes até 2050, tomando como exemplo o parque produtivo e mercado brasileiro: o primeiro, mais conservador, seria a manutenção da indústria sob o atual direcionamento de redução de emissões (*business as usual*); outro, seria o investimento massivo em eficiência das plantas de produção de cimento, uso de combustíveis alternativos e redução do teor de clínquer a partir da utilização de materiais alternativos e aumento de desempenho das matrizes de cimento; e o terceiro seria o investimento em produção de concretos e argamassas em escala industrial, para mitigar os desperdícios associados à autoconstrução. Segundo os autores, a associação do segundo e do terceiro paradigmas possibilitariam a redução em até 56% das emissões totais de  $CO_2$  – 590 Mton até 2050. Os autores ressaltam, no entanto, que no atual cenário produtivo nacional, o processo de industrialização não é competitivo, quando comparado à produção de concretos e argamassas em pequenos canteiros de obras.

Observa-se, no entanto, que o atual sistema industrial de produção do cimento apresenta elevado grau de eficiência térmica, chegando a 80% do que poderia ser obtido, em termos de eficiência energética do parque industrial. Por isso, na cadeia de produção de cimento, é a emissão de  $CO_2$ , e não a energia, o parâmetro preocupante: pela média global, utiliza-se de 89 a 130 kWh/ton de cimento – no Brasil, o consumo elétrico é de 113 kWh/ton de cimento (SNIC, 2019) –, sendo que deste valor, aproximadamente 5% são direcionados para extração e mistura de matérias-primas, 24% para moagem de materiais, 6% para homogeneização, 22% para produção de clínquer (incluindo moagem), 38% para moagem do cimento e 5% para transporte,

carregamento e embalagem. Assumindo 40% de eficiência na geração de eletricidade, tem-se 1080 kJ de energia/kg clínquer (HEWLETT; LISKA, 2019).

Assim, quando se utiliza um combustível alternativo no forno, reduz-se a quantidade de  $CO_2$  despendido no processo. Desse modo, medidas como: 1) o aprimoramento da política nacional de resíduos sólidos (PNRS), através da atualização da legislação existente para acelerar e incentivar o uso de combustíveis alternativos; 2) a criação de legislações específicas sobre coprocessamento de combustíveis derivados de resíduos sólidos urbanos em fornos de cimento; e 3) a fomentação de condições de competitividade entre combustíveis alternativos; poderiam levar à substituição de até 35% dos combustíveis já utilizados na indústria por fontes alternativas até 2030, em um cenário otimista (SNIC, 2019), com redução de até 30 Mton nas emissões cumulativas de poluentes.

Em relação às possibilidades envolvendo fontes energéticas para atuar como combustíveis, a indústria cimentícia tem capacidade de utilizar combustíveis a partir de variadas misturas, incluindo o uso de combustíveis fósseis, biomassas, resíduos de materiais e subprodutos industriais (CEMBUREAU, 2017), como é o caso do caroço de açaí, utilizado no nordeste paraense no processo de calcinação, e que movimenta comunidades locais para sua coleta e beneficiamento.

Desse modo, mitigar a emissão de  $CO_2$  envolvida no processo produtivo passa necessariamente pela redução do consumo de cimento, especialmente através da utilização de materiais alternativos (VIZCAÍNO-ANDRÉS *et al.*, 2015; SKIBSTED; SNELLINGS, 2019), mas cruza também a perspectiva do aumento do uso de combustíveis alternativos por meio do fortalecimento de políticas públicas.

Em contexto nacional, destacam-se diversas medidas de modernização que já são adotadas pela indústria do cimento no Brasil: segundo dados do Roadmap tecnológico do cimento no Brasil (SNIC, 2019), a indústria brasileira apresenta um dos menores índices de emissão de dióxido de carbono no planeta, como resultado de intervenções ativas que ocorrem diretamente sobre o ciclo produtivo, como a modernização dos parques industriais, utilização de tecnologias para redução de consumo energético durante o processo produtivo, incorporação de combustíveis alternativos e utilização de materiais suplementares para redução do consumo de clínquer.

Até 2014, por exemplo, as emissões específicas de  $CO_2$  por tonelada de cimento produzido foram reduzidas de 700 kg para 564 kg— uma queda de 18% das emissões específicas; o uso de combustíveis alternativos saltou

de 5 para 19%; o índice de substituição do clínquer passou de 20 para 33%. O documento ressalta ainda que há perspectiva de redução da razão clínquer/cimento de 67% em 2014 para 52% em 2050, com incremento no uso de argilas calcinadas e calcário, e potencial redução cumulativa de até 290 Mton de CO<sub>2</sub>.

Desse modo, o presente estudo tem como objetivo discutir o potencial de utilização de argila caulínicas (caulim) e calcário, materiais com vasta disponibilidade no território amazônico, para produção de cimentos de baixa emissão de gás carbônico, levando em consideração não somente as particularidades da região, o impacto sobre a indústria construtiva e as questões ambientais envolvidas, como também o desafio de responder às demandas do público consumidor, dando destaque para aquele informal ou de autoconstrução, no qual não há demanda de cimentos de elevado desempenho, ou seja, para o qual é potencialmente viável a produção de cimentos de baixo carbono, com reduzido consumo de clínquer e utilização de insumos alternativos.

## 2 MATERIAIS CIMENTÍCIOS SUPLEMENTARES

Segundo Çankaya e Pekey (2019), apesar de medidas isoladas não serem efetivas para reduções significativas nas emissões de gases poluentes na indústria do cimento, a clínquerização é o principal fator associado ao impacto ambiental do setor: segundo os autores, apenas 3% de redução de materiais tradicionais por insumos alternativos resultaria em redução de 12 kg de CO<sub>2</sub>/ton de clínquer. Assim, a redução de emissão de poluentes é potencialmente viabilizada pelo uso de materiais alternativos, ou seja, componentes que possam agregar sistemas cimentícios tradicionais e reduzir o consumo de clínquer - são os chamados Materiais Cimentícios Suplementares (MCS).

Os MCS podem reduzir o consumo de cimento à medida em que possibilitem a confecção de concretos e argamassas que cumpram as prerrogativas básicas de resistência e durabilidade. Normalmente, por serem materiais mais finos, MCS preenchem vazios nas matrizes cimentícias, possibilitando o refinamento dos poros, a redução de permeabilidade e aumento de resistência. Ao mesmo tempo, no entanto, justamente por possuírem maior área superficial, são materiais que normalmente demandarão maior consumo de água.

Diversos estudos avaliam a utilização de materiais cimentícios suplementares como elementos fundamentais para reduzir emissões de gases poluentes associados à produção do clínquer (ZHOU *et al.*, 2017; DÍAZ *et al.*, 2017; SCRIVENER, *et al.*, 2018; RODRIGUEZ; TOBON, 2020). Tais materiais, normalmente compostos de resíduos e escórias industriais, pozolanas naturais ou minerais ativados, podem apresentar propriedades pozolânicas ou hidráulicas, distintas principalmente quanto aos mecanismos de ativação envolvidos nas reações químicas de cada um: materiais com propriedades pozolânicas são capazes de reagir com hidróxido de cálcio ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) em sistemas aquosos básicos e gerar produtos semelhantes àqueles da hidratação do cimento; aqueles com propriedades sumariamente hidráulicas, por sua vez, não reagem com  $\text{Ca(OH)}_2$ , que funciona como ativador de pH através do aumento de alcalinidade do sistema (SKIBSTED; SNELLINGS, 2019).

Apesar da crescente demanda, MCS apresentam produção em larga escala limitada, especialmente pela escassez, em algumas regiões do planeta, de alguns dos materiais suplementares mais utilizados, como é o caso das escórias de alto forno, que possuem disponibilidade de apenas 10% em relação à massa total de cimento produzido anualmente, e a sílica ativa, que possui disponibilidade de 30% (SCRIVENER *et al.*, 2017).

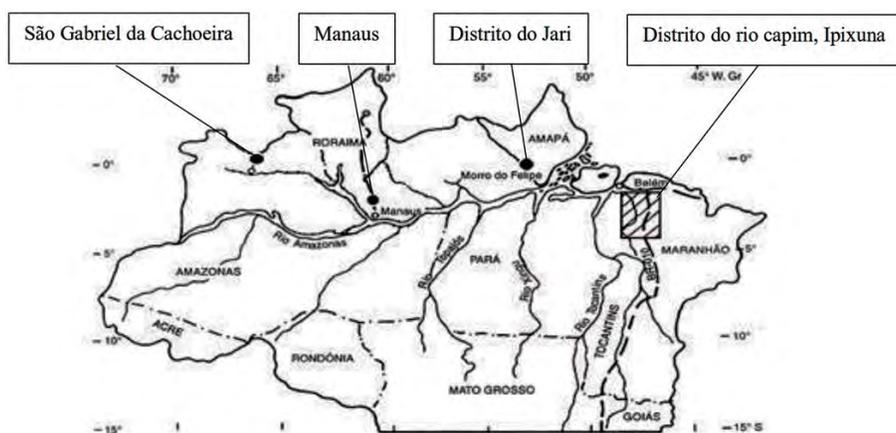
Por outro lado, materiais como argilas e filer calcário apresentam elevado potencial de aplicação como MCS e possuem reservas em todo o planeta. Diversos estudos foram desenvolvidos na última década com enfoque na mistura ternária de argila calcinada, filer calcário e cimento – chamada de  $\text{LC}^3$  (*limestone calcined clay cement*), com o objetivo de endossar a aplicabilidade de tais componentes suplementares em substituição parcial do clínquer (ANTONI *et al.*, 2012; JOSEPH; BISHNOI; MAITY, 2016; DÍAZ *et al.*, 2017; AVET; SCRIVENER, 2018; MUZENDA *et al.*, 2020). Há registros de utilização dessa composição com argila calcinada e calcário no Brasil desde 1991, e a partir dos anos 2000, em estudos realizados na Universidade Federal do Pará (ARRUDA JUNIOR; BRAGA; BARATA, 2023). Zunino, Martinera e Scrivener (2021) ressaltam que cimentos  $\text{LC}^3$  são capazes de atingir resistências similares a cimentos convencionais em apenas 7 dias, para substituições de 50% do clínquer e utilização de até 40% de argila calcinada.

Tais resultados são extremamente promissores, dada a possibilidade de ampla incorporação desses materiais à composição de cimentos: o filer calcário já é normalmente utilizado pela indústria cimenteira na confecção do clínquer, o que faz com que o material seja desde já acessível e, como

o calcário utilizado em composições LC<sup>3</sup> não demanda ativação, há barateamento do insumo; a argila, por sua vez, apesar de passar por processo de desidroxilação (eliminação de Ca(OH)<sub>2</sub> e formação de material amorfo altamente reativo) para ativação das propriedades pozolânicas, demanda temperaturas bastante inferiores àquelas necessárias para produção do clínquer, o que possibilita que o tratamento seja realizado com menor consumo energético e sem grandes intervenções no atual maquinário das indústrias que produzem cimento.

Há gigantesco potencial para misturas ternárias LC<sup>3</sup>, especialmente pela disponibilidade dos materiais e elevada reatividade das argilas caulínicas em território nacional, o que pode conferir elevadas resistências às matrizes cimentícias, principalmente em idades avançadas. Barata (2007) destaca que Brasil e EUA possuem as maiores jazidas de argilas caulínicas (caulim) do mundo, em quantidade e qualidade. Segundo o autor, em 2005 o Brasil apresentava o equivalente a 7,7 bilhões de toneladas de caulim para extração, dos quais até 97% estaria localizado nos estados do Pará (distrito do rio Capim, Ipixuna), Amapá (distrito do Jari, morro do Felipe) e Amazonas (cidade de Manaus e São Gabriel da Cachoeira), o que guarneceria a região Norte com enorme potencial para aproveitamento de matérias-primas amplamente disponíveis (Figura 1).

Figura 1 – Distritos de caulim na Amazônia



Fonte: adaptado de Barata (2007).

O potencial de extração de caulim em território nacional tem sido, desse modo, explorado por companhias mineradoras ao longo das últimas décadas. Dos impactos ambientais e sociais associados à extração de

minérios em diversos biomas do território brasileiro, Mechi e Sanches (2010) destacam a supressão de vegetações originais; a esterilização de camadas de solo antes férteis; o risco de processos erosivos e de assoreamento de leitos de rios; a contaminação de aquíferos de entorno dos locais onde ocorrem atividades de mineração; a alteração do regime hidrológico de cursos d'água; e a geração do resíduo de caulim, entre outros.

Mechi e Sanches (2010) ressaltam ainda como medidas mitigatórias para os impactos do processo de mineração, previstas inclusive na Política Nacional de Meio Ambiente: a criação de planos de gestão de recursos hídricos; gestão de resíduos; e processos de compensação ambiental. Como providência para dirimir impactos associados à geração de resíduos, portanto, sugere-se o potencial incremento do resíduo da extração do caulim à cadeia de produção de cimentos para desenvolvimento de compostos com menor consumo de clínquer, menor emissão de gases poluentes, e consequentemente menor pegada ecológica.

Anualmente, há o beneficiamento de cerca de 1,7-2 Mt de caulim no Brasil (MÁRTIRES, 2009), do qual pelo menos 26% do volume extraído é adequado para uso como MCS devido ao alto teor de caulinita em sua composição (SOUZA; DAL MOLIN, 2005). Isso representaria um potencial médio de 0,48 Mt/ano de resíduos ricos em caulinita para uso como MCS na produção de cimentos de baixo carbono ou outras aplicações.

No Pará, estimou-se a existência de cerca de 10 Mt de resíduos caulíníticos em 2012 (BARATA; ANGÉLICA, 2012), distribuídos na região de Barcarena, nas instalações fabris da Imerys próximas ao porto de Vila do Conde, nas minas da PPSA e da Imerys (ambas na região do Rio Capim-Ipixuna do Pará) e da CADAM, na região do baixo Tocantins, no município de Almerim. Somada a geração de rejeitos em 2021, esse volume pode chegar a aproximadamente 13,4 Mt (SILVA *et al.*, 2021). Atualmente, tais resíduos estão dispostos em cerca de 3,18 km<sup>2</sup> de barragens, configurando-se como passivos ambientais, sem aproveitamento escalonável.

O mercado de cimento em todo o mundo usa caulins disponíveis localmente como MCS, similares a resíduos gerados pela mineração no Brasil. Nesse sentido, e tendo como referência o aproveitamento dos resíduos de caulim amplamente disponíveis na região, a tecnologia de cimentos LC<sup>3</sup> com grandes teores de incorporação de MCS seria semelhante ao cimento composto ou pozolânico (CP IV, que possui de 15% a 50% de pozolanas), uma categoria de cimento amplamente utilizada pelo mercado brasileiro e com potencial de aceitação e incorporação pelo público-alvo.

Desse modo, considerando as mesmas proporções de argila amplamente utilizadas na literatura internacional em cimentos ternários do tipo LC<sup>3</sup> (30% em peso), os resíduos de caulim poderiam fornecer 44,6 Mt de cimento, representando 80% da produção de cimento do Brasil em 2019 (SNIC, 2019). Em relação exclusivamente à região Norte, onde produziu-se em 2021 2,6 Mton de cimento, a disponibilidade do resíduo possibilitaria inclusive consumos superiores aos 30% comumente adotados em LC<sup>3</sup>. Do ponto de vista da extração de matérias-primas, os impactos ambientais podem ser minimizados, pois, para a produção de 1 tonelada de cimento sem substituição do clínquer por materiais alternativos, é necessária maior extração de recursos não renováveis, principalmente o calcário.

### 3 ARGILA CAULÍNICA DA REGIÃO AMAZÔNICA

Caulim é uma argila formada primordialmente por silicatos hidratados de alumínio, tendo como principal constituinte o mineral caulinita ( $Al_2O_3 \cdot 2 SiO_2 \cdot 2H_2O$ ) (MÁRTIRES, 2009). O distrito de caulim do rio Capim, em Ipixuna do Pará, corresponde a aproximadamente 70% de toda a produção de caulim em território nacional, configurando ao Estado o título de maior produtor e exportador desse material no Brasil, e 8º maior produtor de caulim no mundo (ASSUNÇÃO, 2021). Grande parte do caulim extraído é direcionada a cadeias de produção de papel, cerâmica, fibras de vidro e plástico, mas há também representação mercadológica para produção de concretos de elevado desempenho com uso de caulim calcinado (ARRUDA JUNIOR, 2020).

Conforme Barata (2007), as argilas calcinadas possuem grande potencial para emprego como pozolanas no Brasil, uma vez que o material pode ser encontrado em praticamente toda a extensão do território nacional. No entanto, a confecção de cimentos com tal componente foi limitada em todo o mundo, especialmente após 1980, quando as argilas calcinadas perderam espaço para outros subprodutos industriais, como cinza volante e escória de alto forno, insumos que, ao contrário da argila, não demandam custos associados a ativação térmica.

O autor destaca, no entanto, diversos fatores que alteraram os padrões do fluxo de produção de cimentos para maior utilização de argila calcinada, como a modernização da indústria do ferro, que limitou a geração de escórias e resíduos, e a preocupação com a questão ambiental de emissão de gases poluentes, que trouxe de volta à tona a discussão em torno de materiais com elevada disponibilidade e relativa pozolanidade para integrar a composição do cimento.

Nesse sentido, a modernização da cadeia de produção de cimento é elemento determinante para que haja, atualmente, capacidade industrial para incorporação de materiais potencialmente pozolânicos, como o caulim, sem que sejam necessárias drásticas transformações ou elevada modernização do sistema produtivo (BISHNOI *et al.*, 2014; VISCAÍNO-ANDRÉS *et al.*, 2015; DÍAZ *et al.* 2017).

Arruda Junior (2020) ressalta, no entanto, que a publicação da normativa “ABNT NBR 16697: Cimento Portland – Requisitos”, em julho de 2018 (ABNT, 2018), possibilitou a incorporação de até 25% de filer calcário à composição do cimento CP II F – e não mais os 10% permitidos anteriormente, o que mais uma vez limitou a extensa utilização do produto de calcinação de argila caulinítica como MCS em cimentos pozolânicos, visto a queima e tratamento da argila custar até 3 vezes o valor do cimento, e o acréscimo de fileres, ao contrário, permitir o barateamento da produção.

Nesse contexto, destaca-se o desenvolvimento de análises que considerem não somente os requisitos de desempenho mecânico e ecológico para ampla implementação de argilas cauliníticas incrementadas com filer calcário, mas também a viabilidade econômica, que deve atender às demandas de públicos especializados e não especializados. Para esse último grupo, o elevado desempenho mecânico do cimento não é fator preponderante na aquisição do material.

Ressalta-se, no entanto, que a produção em larga escala de cimentos de baixo carbono não garante por si só a redução da emissão de  $CO_2$  na atmosfera pela indústria de construção. Há, na verdade, consenso de que diminuir o consumo de clínquer seja apenas um dos aspectos relevantes para que se possa reduzir a pegada ecológica do mercado de obras (UN ENVIRONMENTAL *et al.*, 2018; REIS *et al.*, 2021). É necessário estabelecer parâmetros pelos quais sejam levadas em consideração a realidade de produção e demanda de cada região, a disponibilidade de insumos e o padrão de consumo de materiais cimentícios.

Em estudos recentes, verificou-se a viabilização de medidas estruturais e mercadológicas para mitigar a emissão de gases poluentes e alcançar o objetivo de redução de temperatura em até 2°C abaixo do que é previsto para 2050, com diminuição da emissão de  $CO_2$  em aproximadamente 550 Mt (VIZCAÍNO-ANDRÉS *et al.*, 2015; DÍAZ *et al.*, 2017; MILLER *et al.*, 2018; REIS *et al.*, 2021). Os trabalhos em questão tiveram como objetivo comum apresentar argumentos em prol de medidas combinadas, com potencial mitigatório, bem como viabilidade econômica e industrial para implementação.

A combinação de medidas como otimização das plantas industriais, uso de combustíveis alternativos, redução de consumo de clínquer, otimização da produção de concretos e argamassas para obras através da industrialização, e o uso de fileres e misturadoras planetárias apresentam grande potencial para redução das emissões de  $CO_2$  na atmosfera (REIS *et al.*, 2021). Por outro lado, o aumento de 15% da produção industrializada possibilitaria a redução de emissão de gases poluentes em até 530 Mt – em torno de 96% do que é almejado para redução de 2°C até 2050. Tecnologias de captura e armazenamento de carbono, por sua vez, apesar de potencialmente funcionais, ainda não foram totalmente desenvolvidas, e podem ser inviabilizadas em médio prazo, devido a elevados custos de implantação (MILLER *et al.*, 2018).

#### 4 IMPACTOS SOBRE A INDÚSTRIA DO CIMENTO

Em relação à indústria cimenteira nacional, o desenvolvimento de composições ternárias com substituição de clínquer por argila calcinada e filer calcário possui ampla potencialidade e viabilidade operacional, uma vez que é possível incorporar às misturas argilas ricas em caulinita, altamente pozolânicas, sem necessidade de grandes incrementos ao maquinário ou à logística produtiva. Além disso, há ainda disponibilidade de resíduos do beneficiamento de caulins secundários, provenientes de atividades de mineração para outros segmentos industriais, e que podem ser reaproveitados para a confecção de cimentos de baixo carbono (ARRUDA JUNIOR, 2020), o que por si só já agregaria ainda mais benefícios à cadeia de produção do cimento.

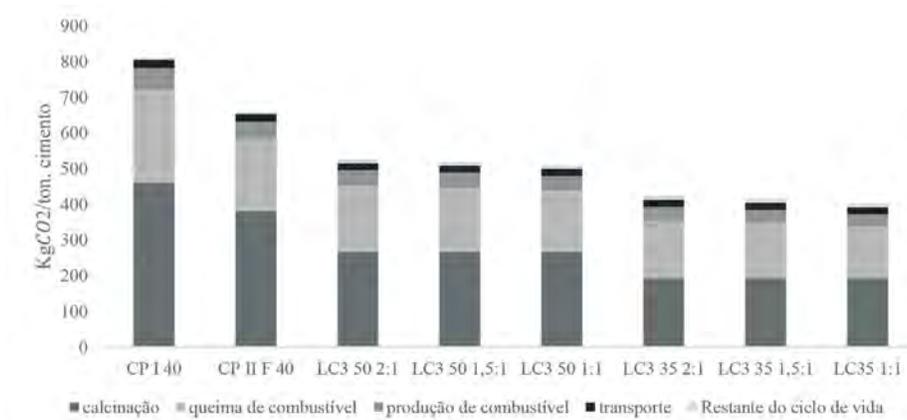
Um estudo adaptado de Scrivener *et al.* (2017) enfatiza que, apesar das diferenças de reatividade das argilas - representada pelo teor de caulinita - não afetarem de modo determinante as resistências iniciais das matrizes cimentícias, há, por outro lado, refinamento das características do material para idades mais avançadas, com potencial para significativos acréscimos à resistência à compressão e durabilidade, principalmente em misturas com argilas ricas em caulinita. Isso ocorre porque o metacaulim, produto da calcinação de argilas caulínicas a até 900°C, ao reagir com hidróxido de cálcio gerado na hidratação do cimento, água e filer calcário em cimentos  $LC^3$  forma compostos que favorecem o refinamento de poros na matriz cimentícia. (PARASHAR; BISHNOI, 2021; ZUNINO; MARTINERA; SCRIVENER, 2021).

Parashar e Bishnoi (2021) destacam ainda que para proporções idênticas (30%-15%-5%) de argila calcinada-fíler calcário-gesso ou escória de alto forno-fíler calcário-gesso em substituição de 50% do clínquer, a composição LC<sup>3</sup> apresenta desempenho mecânico em 90 dias superior ao da mistura ternária com escória de alto forno ou à referência composta por cimento comum, ratificando a potencialidade do LC<sup>3</sup>.

Diante disso, Arruda Junior (2020) afirma que a produção de cimentos LC<sup>3</sup> com metacaulim de elevada reatividade (>90% de caulinita) disponíveis a nível regional possibilitaria a substituição de maiores percentuais de clínquer. Isso resultaria em uma redução significativa na emissão de gases poluentes provenientes da fabricação do cimento.

Nesse sentido, o autor avaliou a pegada ecológica (emissão de CO<sub>2</sub>) de cimentos LC<sup>3</sup> com diferentes composições de argila calcinada e fíler calcário, em comparação a Cimento Portland CP I 40 e cimento Portland CP II F 40 (Figura 2). Cimentos desenvolvidos com 50% até 65% de substituição de clínquer apresentaram emissão de dióxido de carbono entre 415 e 520 Kg/ton de cimento, o que equivaleria a reduções de até 38% nas emissões totais em comparação aos cimentos convencionais disponíveis no mercado. O autor verificou ainda redução de demanda energética em até 28%.

Figura 2 – Emissão de CO<sub>2</sub> para cimento LC<sup>3</sup> e cimentos convencionais



Fonte: adaptado de Arruda Junior (2020).

Além disso, em análise do ciclo de vida de cimentos LC<sup>3</sup> produzidos com resíduos caulíníticos disponíveis na região amazônica, Arruda Junior, Braga e Barata (2023) verificaram ainda que o uso de argilas caulíníticas resultou em reduções de 10-40% na demanda energética em relação a

cimentos convencionais disponíveis na região. Além disso, os autores observaram que a substituição de 60% do clínquer por argilas caulínicas e calcário (à proporção 1:1) resultou em cimentos com potencial para utilização em segmentos de mercado de autoconstrução, quando se considerou o desempenho mecânico como fator preponderante. Para uso no segmento industrial, observou-se que os cimentos LC<sup>3</sup> apresentaram desempenho mecânico satisfatório para até 50% de substituição do clínquer.

Em outra abordagem com uso dos mesmos insumos regionais, Jesus *et al.* (2023) abordaram o uso de resíduos caulínicos para produção de concretos coloridos perante condições climáticas da região amazônica. Os autores observaram que concretos produzidos com cimentos de baixo carbono (como resultado da incorporação de resíduos caulínicos) apresentaram elevado desempenho mecânico para 28 dias ou mais, redução de 30-40% do consumo de cimento, além de elevado potencial de pigmentação, ressaltando-se, desse modo, o uso de cimentos com resíduos da região.

Tais estudos apresentam um conjunto de resultados promissores para a utilização de resíduos caulínicos da região amazônica para a produção de cimentos de baixo carbono, seja para o mercado informal, seja para segmentos industriais. Os resultados, apesar de não responderem pela totalidade de impactos sociais e ambientais da indústria de mineração na região, possibilitam avaliar a viabilidade econômica e de escalonamento de alternativas mitigatórias para os depósitos de resíduos caulínicos, com uso em largas proporções por um segmento industrial em pleno crescimento, que é o da produção de cimentos.

## 5 LIMITAÇÕES

Aviabilidade produtiva e os aspectos ambientais relacionados à produção de cimentos de baixo carbono são pontos positivos para a implementação de LC<sup>3</sup> em larga escala. Há, no entanto, considerações importantes em relação ao atendimento às perspectivas do mercado consumidor: em países em desenvolvimento, onde se consome em torno de 90% de todo o cimento produzido no planeta, há grande incidência de comunidades em situação de vulnerabilidade social, com até 65% das populações urbanas vivendo em favelas, com baixo ou nenhum acesso a sistemas de saneamento básico. Diante dessa perspectiva, perdas de cimento associadas a desperdícios, que podem chegar a 50% para concretos produzidos em obra, são comuns, dadas as condições e a realidade dos canteiros de construção. Por isso,

medidas mitigatórias que levem em consideração o contexto regional e suas implicações devem necessariamente estabelecer contato com as demandas de consumo e realidade dessas comunidades.

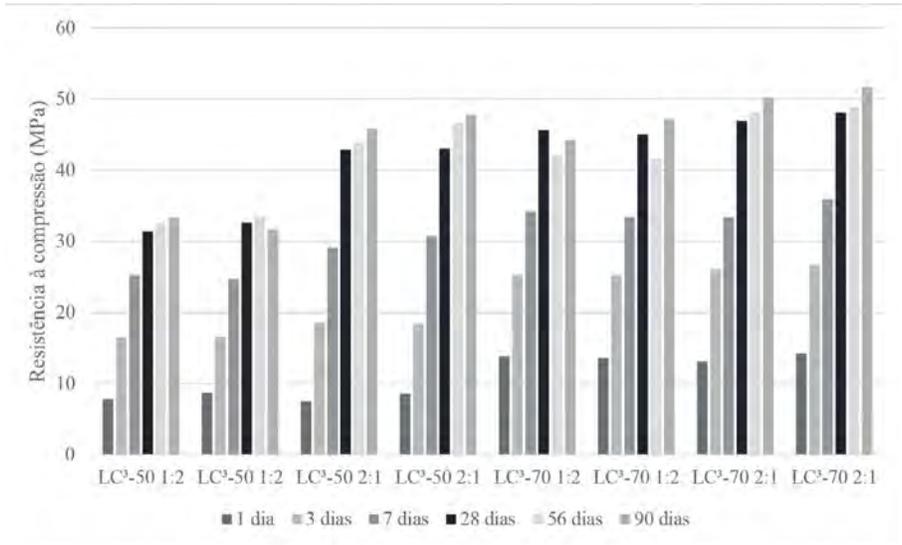
Há também, como fator limitante para o escalonamento de produção de cimentos  $LC^3$ , o baixo desempenho mecânico em idades iniciais – até os 7 dias. Isso ocorre porque, ao reduzir a quantidade de clínquer na mistura, reduz-se também a ocorrência das reações de hidratação do  $C_3S$  e a geração inicial de C-S-H, que são responsáveis por grande parte da resistência associada à matriz de cimento, notadamente até os 3 dias (DHANDAPANI; SANTHANAM, 2020).

É imprescindível que estudos que abordem a aplicabilidade de MCS considerem não apenas a validação experimental de cada material para produção de elementos de elevado desempenho. Existem parâmetros igualmente relevantes ao desempenho para consumo industrial, que justificam a necessidade de que tais estudos sejam realizados. A redução da pegada de carbono também está condicionada à viabilidade econômica e experimental para públicos não especializados, para os quais cimentos de alto desempenho possuem baixo apelo econômico.

A produção de cimentos  $LC^3$  com maior consumo de filer calcário e menor consumo de argila calcinada, por sua vez, pode potencializar resultados promissores para o mercado informal: o maior consumo de filer reduz os custos de produção e a emissão de  $CO_2$  associados. A aplicação de argila calcinada em menores proporções, por sua vez, ainda garante o elevado desempenho do material. Rodriguez e Tobon (2020) desenvolveram estudo onde foram realizadas substituições de até 50% de clínquer por argila calcinada e filer calcário em proporções de 2:1 e 1:2, respectivamente (Figura 3), variando a utilização de  $SO_3$ . Conforme resultados observados pelos autores, cimentos com substituição de 30% e proporção de 1:2 apresentaram até 45 MPa de resistência à compressão após 90 dias. Além disso, todas as amostras apresentaram resistências acima de 30 MPa aos 28 dias.

Além disso, os autores verificaram que para cimentos com 50% de substituição do clínquer, houve incremento de resistência à penetração de componentes corrosivos presentes no ar e na água de 6 a 16 vezes para misturas com proporções 1:2 e 2:1, respectivamente. Observa-se, desse modo, o potencial para desenvolvimento de cimentos  $LC^3$  com maior consumo de filer calcário, menor pegada ecológica e atendimento ao desempenho requerido para o mercado de autoconstrução, dada a possibilidade de barateamento do cimento.

Figura 3 – Resistência à compressão de cimentos LC<sup>3</sup> com 30 e 50% de substituição do clínquer, e razões de argila calcinada e fíler calcário 2:1 e 1:2



Fonte: Adaptado de Rodriguez e Tobon (2020).

## 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O acelerado consumo de materiais cimentícios para dar suporte a obras de infraestrutura e desenvolvimento de centros urbanos, especialmente em países em desenvolvimento, agrega diversos problemas ambientais, associados à emissão de gases poluentes e massiva utilização de matérias-primas não renováveis. Desse modo, principalmente a partir da última década, diversos esforços têm procurado mitigar a pegada ecológica de materiais à base de cimento, através da ampliação e modernização das plantas de produção de cimentos (SANTOS, 2011), otimização de misturas de concretos e argamassas e redução do consumo de clínquer, através da incorporação de materiais cimentícios suplementares.

Dentre os materiais com maior potencial para substituição do clínquer, devido à disponibilidade e pozolanicidade, estão o fíler calcário e a argila calcinada, respectivamente. Estudos que combinam os dois materiais em uma mistura ternária composta de clínquer, calcário e argila revelaram resultados extremamente promissores quanto à resistência mecânica e contra agentes deletérios, bem como elevada durabilidade.

A excepcionalidade dos resultados experimentais, associada à vasta disponibilidade destas matérias-primas em todo o planeta, sugere uma considerável capacidade mitigatória dos cimentos LC<sup>3</sup>. No entanto, há o desafio de criar composições que atendam não somente à indústria especializada, através de misturas de elevado desempenho, mas também de suprir as demandas do mercado de autoconstrução. Atualmente, esse mercado é responsável por mais de 40% de todo o cimento consumido e gera um desperdício médio de até 50% de cimento e agregados na produção de concretos e argamassas.

Assim, à demanda de desempenho requerida em normativas, soma-se a necessidade de produção de cimentos com menor consumo energético e a menor pegada ecológica possível, tomando-se em consideração perdas e desperdícios que são inerentes a um público consumidor não especializado. Sob essa perspectiva, diversos estudos recentes foram desenvolvidos com o uso de insumos regionais, com o intuito de propor alternativas para redução do consumo de clínquer em composições cimentícias. Resultados promissores incluem a redução do gasto energético, menores emissões de gases poluentes e elevados graus de substituição do cimento. Tais resultados revelam a viabilidade de escalonamento da produção de cimentos de baixo carbono, especialmente no contexto regional, e a potencial compensação de alguns dos impactos inerentes à indústria de mineração que atua no país.

## REFERÊNCIAS

- ABNT. **NBR 16697**: Cimento Portland – Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.
- ANTONI, M.; ROSSEN, J.; MARTINERA, F.; SCRIVENER, K. Cement substitution by a combination of metakaolin and limestone. **Cement and Concrete Research**, [s. l.], v. 42, p. 1579-1589, 2012.
- ARRUDA JUNIOR, E. S. **Cimentos de baixo impacto ambiental (LC<sup>3</sup>) a partir dos resíduos caulíníticos da Amazônia**. 2020. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) – Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo, Universidade Federal do Pará, Belém, 2020.
- ARRUDA JUNIOR, E. S.; BRAGA N. T. S.; BARATA, M. S. Life cycle assessment to produce LC<sup>3</sup> cements with kaolinitic waste from the Amazon region, Brazil, **Case Studies in Construction Materials**, [s. l.], Vol. 18, e01729, 2023.

ASSUNÇÃO, T. Caulim: das minas para o seu dia a dia. **O Liberal**, Belém, 10 maio 2021. Disponível em: <https://www.oliberal.com/nossominerio/caulim-das-minas-para-o-seu-dia-a-dia-1.385442>. Acesso em: 10 jun. 2023.

AVET, F.; SCRIVENER, K. Investigation of the calcined kaolinite content on the hydration of limestone calcined clay cement (LC3). **Cement and Concrete Research**, [s. l.], Vol. 107, p. 124-135, 2018.

BARATA, M. S. **Aproveitamento dos resíduos caulíníticos das indústrias de beneficiamento de caulim da região amazônica como matéria-prima para fabricação de um material de construção (pozolanas)**. 2007. Tese (Doutorado em Geoquímica e Petrologia) – Programa de Pós-Graduação em Geologia e Geoquímica, Universidade Federal do Pará, Belém, 2007.

BARATA, M. S.; ANGÉLICA, R. S. Caracterização dos resíduos caulíníticos das indústrias de mineração de caulim da Amazônia como matéria-prima para produção de pozolanas de alta reatividade, **Cerâmica**, São Paulo, v. 58, p. 36-42, 2012.

BISHNOI, S.; MAITY, S.; MALLIK, A.; JOSEPH, S.; KRISHNAN, S. Pilot scale manufacture of limestone calcined clay cement: The Indian experience. **Indian Concrete Journal**, [s. l.], v. 88, 22–28, 2014.

BRAGA, N. T. S.; GOUVEIA, M. S. Dialética da ocupação de áreas de várzea em Belém e propostas de drenagem compreensiva. **Novos Cadernos NAEA**, Belém, v. 23, n. 1, p. 243-260, jan./abr. 2020.

BRITO, J.; KURDA, R. The past and future of sustainable concrete: A critical review and new strategies on cement-based materials. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 281, e123558, 2021.

ÇANKAYA, S., PEKEY, B. A comparative life cycle assessment for sustainable cement production in Turkey. **Journal of Environmental Management**, [s. l.], Vol. 249, e109362, 2019.

CEMBUREAU. **CEMBUREAU - The European Cement Association**. [S. l.]: Cembureau, 2017.

DHANDAPANI, Y.; SANTHANAM, M. Influence of Calcined Clay-Limestone ratio on properties of concrete with limestone calcined clay cement (LC<sup>3</sup>). *In*: BISHNOI, S. (ed.). **Calcined Clays fo Sustainable Concrete**. London: Springer, 2020. p. 67-73.

DÍAZ, Y. C.; BERRIEL, S. S.; HEIERLI, U.; FAVIER, A. R.; MACHADO, I. R. S.; SCRIVENER, K. L.; HERNÁNDEZ, J. F. M.; HABERT, G. Limestone calcined clay cement as a low-carbon solution to meet expanding cement demand in emerginf economies. **Development Engineering**, [s. l.], Vol. 2, p. 82-91, 2017.

HABERT, G.; LACAILLERIE, J. B. D.; ROUSSEL, N. An environmental evaluation of geopolymers based concrete production: Reviewing current research trends. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], Vol. 19, p. 1229-1238, 2011.

HEWLETT, P. C.; LISKA, M. The Production of Low Energy Cements. *In*: LEA, F. M. (ed.). **Lea's Chemistry of Cement and Concrete**. 5. ed. London: Elsevier, 2019. p. 341-362.

IEA. **Technology Roadmap: Low-carbon transition in cement industry**. France: IEA, 2018.

JESUS, C. F.; ARRUDA JUNIOR, E. S.; BRAGA, N. T. S.; SILVA JUNIOR, J. A.; BARATA, M. S. Coloured concrete produced from low-carbon cements: mechanical Properties, chromatic stability and sustainability. **Journal of Building Engineering**, [s. l.], Vol. 67, e106018, 2023.

JOSEPH, S.; BISHNOI, S.; MAITY, S. An economic analysis of the production of limestone calcined clay cement in India. **The Indian Concrete Journal**, [s. l.], Vol. 90, p. 1-7 2016.

MÁRTIRES, R. A. C. Caulim. *In*: BRASIL. **Economia Mineral do Brasil**. Brasília, DF: DNPM, 2009. p. 474- 483.

MATOS, P. R.; FOIATO, M.; PRUDÊNCIO JUNIOR, L. R. P. Ecological, fresh state and long-term mechanical properties of high-volume fly ash high-performance self-compacting concrete. **Construction and Building Materials**, [s. l.], Vol. 203, p. 282-293, 2019.

MECHI, A.; SANCHES, D. L. Impactos ambientais da mineração no Estado de São Paulo. **Estudos Avançados**, São Paulo, v. 24, n. 68, p. 209-220, 2010.

MILLER, S. A.; JOHN, V. M.; PACCA, S. A.; HORVATH, A. Carbon dioxide reduction potential in the global cement industry by 2050. **Cement and Concrete Research**, [s. l.], Vol. 114, p. 115-124, 2018.

MUZENDA, T. R.; HOU, P.; KAWASHIMA, S.; SUI, T. The role of limestone and calcined clay on the rheological properties of LC3. **Cement and Concrete Composites**, [s. l.], Vol. 107, e103516, 2020.

OLIVIER, J. G. J.; JANSSENS-MAENHOUT, G.; MUNTEAN, M.; PETERS, J. A. H. W. **Trends in Global CO2 Emissions: 2015 Report**, PBL Holanda, Environmental Assessment Agency; Ispra: European Commission, Joint Research Centre, The Hague, 2015. Disponível em: [https://www.pbl.nl/sites/default/files/downloads/pbl-2015-trends-in-global-co2-emissions\\_2015-report\\_01803\\_4.pdf](https://www.pbl.nl/sites/default/files/downloads/pbl-2015-trends-in-global-co2-emissions_2015-report_01803_4.pdf). Acesso em: 15 out. 2021.

ORSINI, F.; MARRONE, P. Approaches for a low-carbon production of building materials: A review. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], Vol. 241, e118380, 2019.

PARASHAR, A.; BISHNOI, S. Hydration behavior of limestone-calcined clay and limestone-slag blends in ternary cement. **RILEM Technical Letters**, [s. l.], Vol. 6, p. 17-24, 2021.

REIS, D. C.; QUATTRONE, M.; SOUZA, J. F. T.; PUNHAGUI, K. R. G.; PACCA, S. A.; JOHN, V. M. Potencial CO<sub>2</sub> reduction and uptake due to industrialization and eficiente cement use in Brazil by 2050. **Journal of Industrial Ecology**, [s. l.], Vol. 25, p. 344-358, 2021.

RODRIGUEZ, C.; TOBON, J. I. Influence of calcined clay/limestone, sulfate and clinker proportions on cement performance. **Construction and Building Materials**, [s. l.], Vol. 251, e119050, 2020.

SANTOS, L. B. A indústria de cimento no Brasil: origens, consolidação e internacionalização. **Sociedade & Natureza**, Uberlândia, v. 23, n. 1, p. 77-94, abr. 2011.

SCRIVENER, K.; MARTINERA, F.; BISHNOI, S.; MAITY, S. Calcined clay limestone cements (LC<sup>3</sup>). **Cement and Concrete Research**, [s. l.], Vol. 114, p. 49-56, 2018.

SILVA, M. R. C.; MALACARNE, C. S.; LONGHI, M. A.; KIRCHHEIM, A. P. Valorization of kaolin mining waste from the Amazon region (Brazil) for the low-carbon cement production, **Case Studies in Construction Materials**, [s. l.], Vol. 15, e00756, 2021.

SKIBSTED, J.; SNELLINGS, R. Reactivity of supplementary cementitious materials (MCSs) in cement blends. **Cement and Concrete Research**, [s. l.], Vol. 124, e105799, 2019.

SNIC. **ROADMAP tecnológico do cimento**: potencial de redução das emissões de carbono da indústria do cimento brasileira até 2050. Rio de Janeiro: SNIC, 2019. 64 p.

SOUZA, P. S. L.; DAL MOLIN, D. C. C. Viability of using calcined clays, from industrial by-products, as pozzolans of high reactivity, **Cement and Concrete Research**, [s. l.], Vol. 35, p. 1993-1998, 2005.

TOPALOV, C. **Ganancias y rentas urbanas**. 1. ed. Madrid: Siglo XXI, 1984.

UN ENVIRONMENT; SCRIVENER, K. L.; JOHN, V. M.; GARTNER, E. M. Eco-efficient cements: Potential economically viable solutions for a low-CO<sub>2</sub> cement-based materials industry. **Cement and Concrete Research**, [s. l.], Vol. 114, p. 2-26, 2018.

UWASU, M.; HARA, K.; YABAR, H. World cement production and environmental implications. **Environmental Development**, [s. l.], Vol. 10, p. 36-47, 2014.

VIZCAÍNO-ANDRÉS, L. M.; SÁNCHEZ-BERRIEL, S.; DAMAS-CARRERA, S.; PÉREZ-HERNÁNDEZ, A.; SCRIVENER, K. L.; MARTINERA-HERNÁNDEZ, J. F. Industrial trial to produce a low clinker, low carbon cement. **Materiales de Construcción**, [s. l.], v. 65, p. 317, 2015.

ZHOU, D.; WANG, R.; TYRER, M.; WONG, H.; CHEESEMAN, C. Sustainable infrastructure development through use of calcined excavated waste clay as a supplementary cementitious material. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], Vol. 168, p. 1180-1192, 2017.

ZUNINO, F., MARTINERA, F., SCRIVENER, K. Limestone Calcined Clay Cements (LC<sup>3</sup>). **ACI Materials Journal**, [s. l.], Vol. 118-M43, 2021.

Submissão: 19/11/2021 • Aprovação: 30/06/2023