

Potencial de captura de CO₂ de agregados graúdos reciclados de concreto no cenário nacional

VICTOR SALDANHA CASSEL - DR. - (victorcassel@hotmail.com) – UFRGS

KATHLEEN DALL BELLO DE SOUZA RISSON - PROF.^a DR.^a - <https://orcid.org/0000-0003-4296-1988> – IFPR

DENISE C. C. DAL MOLIN - PROF.^a DR.^a - <https://orcid.org/0000-0003-1934-7533> – UFRGS

KATIA R. G. PUNHAGUI - PROF.^a DR.^a - <https://orcid.org/0000-0002-4956-3440>; EDNA POSSAN - PROF.^a - <https://orcid.org/0000-0002-3022-7420> – UNILA

RESUMO

A UTILIZAÇÃO DE CO₂ EM RESÍDUOS DE CONCRETO TEM SIDO AVALIADA COMO UMA ALTERNATIVA DE APLICAÇÃO DAS TECNOLOGIAS DE CAPTURA, UTILIZAÇÃO E ARMAZENAMENTO DE CARBONO (CCUS). NESSE SENTIDO, ESTA PESQUISA TEVE COMO OBJETIVO AVALIAR O POTENCIAL DE CAPTURA DE CO₂ DE DIFERENTES AGREGADOS GRAÚDOS RECICLADOS DE CONCRETO, CONSIDERANDO A COMPOSIÇÃO QUÍMICA DO CIMENTO E A RESISTÊNCIA DO CONCRETO QUE DÁ ORIGEM AOS AGREGADOS RECICLADOS. PARA ISSO, FORAM PRODUZIDAS DUAS COMPOSIÇÕES DE CONCRETO, VARIANDO O TIPO DE CIMENTO (CP IV-32 E CP V ARI) E, APÓS O PROCESSO DE BRITAGEM, AS PARTÍCULAS FORAM COLOCADAS EM CÂMARA DE CARBONATAÇÃO (UR 65%, CO₂ 15%, TEMPO 24H), PARA A MINERALIZAÇÃO DO CO₂. CONS-

TATOU-SE QUE A CARBONATAÇÃO COMPLETA DAS PARTÍCULAS DO AGREGADO RECICLADO TEM POTENCIAL DE CAPTURAR DE 14,65 A 17,69 KG DE CO₂ POR TONELADA DE PRODUTO. A DEPENDER DO ÍNDICE DE RECICLAGEM NO BRASIL E DA PRÉ-CARBONATAÇÃO DOS AGREGADOS RECICLADOS, POR ESTA ESTRATÉGIA É POSSÍVEL CAPTURAR DE 6,5 A 38,5 KTCO₂/ANO, INDICANDO QUE ESTA SOLUÇÃO PODE SER DE INTERESSE PARA O MERCADO DE CARBONO.

PALAVRAS-CHAVE: CAPTURA E UTILIZAÇÃO DE CARBONO, MINERALIZAÇÃO DE CO₂, AGREGADO RECICLADO DE CONCRETO (ARC), CRÉDITO DE CARBONO.

1. INTRODUÇÃO

Em 2019, as emissões de Gases do Efeito Estufa (GEE) atingiram

59 ± 6,6 Gt.CO₂-eq por ano¹, um aumento de 54% em relação a 1990 (IPCC, 2022). No Brasil, foram emitidas aproximadamente 1,68 Gt.CO₂-eq em 2020 (MCTI, 2022). Dentre esses gases, o dióxido de carbono (CO₂) se destaca como o principal responsável pelo aquecimento global. Esse fenômeno, por sua vez, desencadeia uma série de mudanças preocupantes: provoca eventos climáticos extremos, eleva o nível do mar e ameaça ecossistemas e biodiversidade. Diante desse cenário, a redução das emissões de CO₂ torna-se uma prioridade inadiável neste século.

Em seu relatório “Net Zero até 2050”, lançado em 2021, a Agência Internacional de Energia (no inglês, *International Energy Agency - IEA*) aponta as Tecnologias de Captura, Utilização e Armazenamento de carbono (no inglês, *Carbon Capture, Utilization and Storage - CCUS*) como as principais estratégias viabilizadoras para zerar as emissões de CO₂ até 2050 (IEA, 2021). Estima-se que até 4,2 Gt de CO₂ por ano poderiam ser capturados e armazenados com o estabelecimento de 160 plantas industriais de CCUS em todo o mundo, a custos inferiores a US\$ 85,00 por tonelada de CO₂ (GLOBAL CCS INSTITUTE, 2023). Um dos pontos centrais nas estratégias de CCUS está no desenvolvimento e ampliação de tecnologias voltadas ao uso do carbono, onde o CO₂ torna-se matéria-prima em produtos e processos, reduzindo

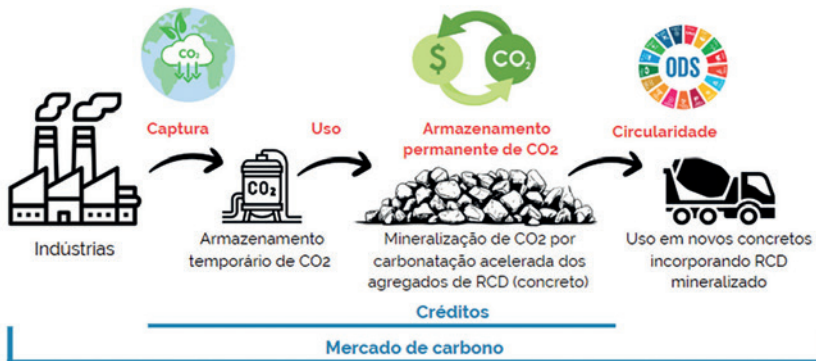


FIGURA 1

ROTA DE USO DE CARBONO PARA MINERALIZAÇÃO DE CO₂ EM AGREGADOS RECICLADOS DE CONCRETO

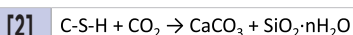
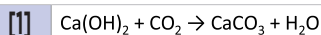
FONTE: AUTORES (2024)

¹ AS MÉTRICAS DE EMISSÃO DE GEE SÃO USADAS PARA EXPRESSAR AS EMISSÕES DE DIFERENTES GASES DE EFEITO ESTUFA EM UMA UNIDADE COMUM, EM CO₂-EQUIVALENTE (CO₂-EQ).

os custos associados à sua remoção.

A utilização do CO₂ para mineralização em agregados reciclados de resíduos da construção e demolição (RCD), especialmente de resíduos de concretos (RC), é uma estratégia que pode ser de interesse comercial pois, além de armazenar permanentemente o carbono, confere melhorias nas propriedades físicas do material. Nessa rota tecnológica, o CO₂ capturado de fontes industriais é utilizado para o tratamento dos agregados reciclados. No processo, o CO₂ reage quimicamente com minerais como silicatos de cálcio ou magnésio, sendo permanentemente armazenado na forma de carbonatos termodinamicamente estáveis e insolúveis (CaCO₃/MgCO₃). Esse processo pode ser usado em resíduos industriais como lamas de papel, cinzas de biomassas e em agregados e pós reciclados de RCD, entre outros.

Nos agregados reciclados de RCD, o principal produto formado da reação, o carbonato de cálcio (CaCO₃), precipita no espaço poroso do sistema e densifica toda a microestrutura. De acordo com as reações (1) e (2), após a carbonatação, o volume sólido pode ser aumentado em 11,8% com base na reação (1) e cerca de 23% com base na reação (2) (XUAN; ZHAN; POON, 2016), resultando em um aumento da densidade, uma diminuição porosidade capilar e, conseqüentemente, da absorção de água, e um aumento da resistência à compressão (CASSEL, 2024).



O potencial de captura de carbono



FIGURA 2

PROCESSO DE MINERALIZAÇÃO DE CO₂ EM AGREGADOS DE CONCRETO

FONTE: AUTORES (2024)

dos agregados reciclados de RCD é estimado entre 7,90 e 190,00 kg.CO₂/ton de material (XUAN; ZHAN; POON, 2016; POON *et al.*, 2023; CASSEL, 2024), a depender:

- (i) das condições do processamento - como uso de reatores dinâmico ou câmaras estáticas, métodos de carbonatação como gás-sólido ou líquido-sólido, temperatura, umidade relativa do ambiente, umidade das partículas, pressão, vazão do gás e tempo de exposição;
- (ii) da pré-carbonatação do concreto de origem ao RCD durante o ciclo da vida da construção;
- (iii) do tempo para processamento e período de armazenamento dos RCD antes do processo de mineralização;
- (iv) das características dos agregados reciclados como origem e composição química; e,
- (v) da dimensão das partículas.

Nesse sentido, a mineralização de carbono em agregados reciclados pode ser considerada uma rota complemen-

tar à injeção do CO₂ em depósitos geológicos profundos, que gera crédito de carbono, além de potencializar o uso dos agregados reciclados, promovendo a economia circular. Como consequência, tem-se a diminuição da extração de agregados naturais e redução das emissões associadas a esses processos, estratégias que estão alinhadas com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável 12 e 13, que envolvem consumo e produção responsáveis e ações contra as mudanças climáticas, conforme ilustrado na Figura 1.

Em 2022, o Brasil gerou aproximadamente 107 milhões de toneladas de Resíduos de Construção e Demolição (RCD), dos quais cerca de 17% desta quantidade foram convertidas em agregados reciclados (ABRECON, 2024). Diante do crescimento desse mercado, este artigo tem como objetivo avaliar o potencial de captura de CO₂ devido à mineralização por carbonatação acelerada de agregados graúdos reciclados de concreto (AGRC) no cenário nacional.

TABELA 1

CARACTERÍSTICAS DOS CONCRETOS QUE DERAM ORIGEM AO AGRC

Identificação do concreto	Tipo de cimento	Consumo de cimento (kg/m ³)	Relação água/ cimento	Resistência à compressão (MPa)		Absorção por capilaridade (g/cm ²) - 72h > 28 dias
				7 dias	28 dias	
IV_65	CP IV-32	292,6	0,65	7,4	-*	1,3
V_65	CP V ARI	279,9	0,65	19,2	24,9	1,2

* DADO INCONSISTENTE QUANDO À RESISTÊNCIA AOS 28 DIAS. PARA CONFIRMAÇÃO DOS RESULTADOS, A DOSAGEM DESTES TRAÇOS SERÁ REPETIDA. PELA COMPARAÇÃO COM INDICADORES FÍSICOS (ABSORÇÃO DE ÁGUA, ARGAMASSA ADERIDA E MASSA ESPECÍFICA), A RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DESTES CONCRETOS É LIGEIRAMENTE INFERIOR AO CONCRETO PRODUZIDO COM CIMENTO CP V

FONTE: CASSEL (2024)

TABELA 2

CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DOS AGRC

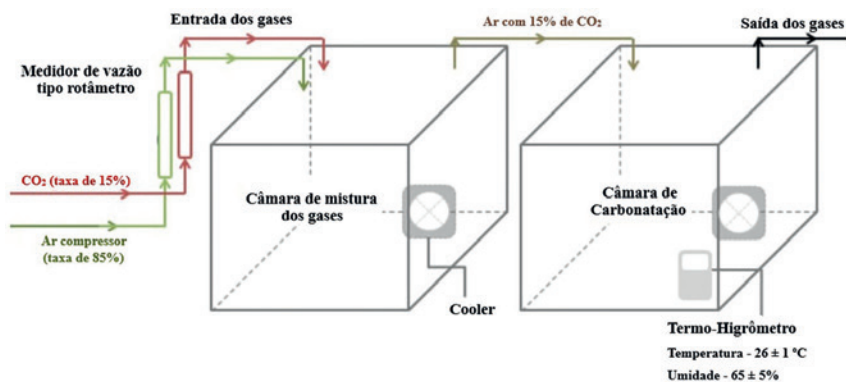
Nomenclatura dos agregados	Dimensão máxima característica $D_{m\acute{a}x}$ (mm)	Teor de argamassa aderida (%)	Índice de forma	Massa unitária (g/cm^3)
AGRC. IV_65	19	41,69	2,15	1,35
AGRC. V_65	19	47,23	2,06	1,39

FONTE: CASSEL (2024)

2. MINERALIZAÇÃO DE CO_2 EM AGREGADOS RECICLADOS

Face às características químicas, o maior potencial de captura de carbono ocorre em agregados reciclados de con-

creto e, para avaliar e quantificar esse potencial, foram produzidos dois tipos de concretos, em laboratório, gerando agregados reciclados sem pré-carbonatação, conforme processo da Figura 2.

**FIGURA 3**

ESQUEMA DE CÂMARA DE CARBONATAÇÃO UTILIZADA

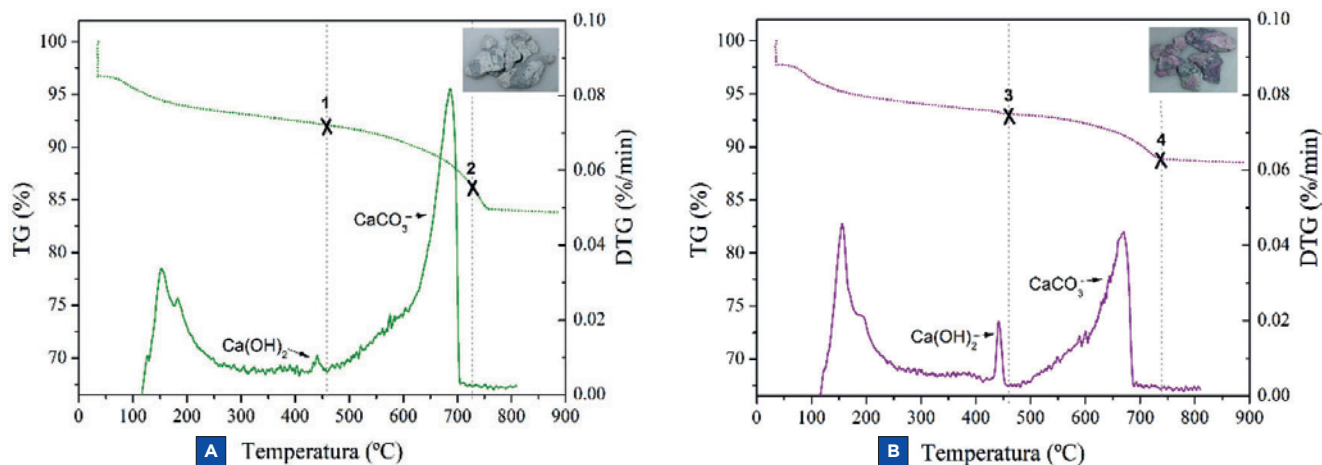
FONTE: ADAPTADO DE MASCOLO (2023)

2.1 Produção dos Agregados Graúdos Reciclados de Concreto (AGRC)

Para a produção dos Agregados Graúdos Reciclados de Concreto (AGRC), foram produzidas duas misturas de concreto (Tabela 1) com dois tipos de cimento, o cimento Portland Pozolânico (CP IV-32) e o cimento Portland de Alta Resistência Inicial (CP V ARI), para uma mesma relação água/cimento (a/c) em 0,65.

Após a caracterização dos concretos aos 28 dias, fez-se a cominuição em britador de mandíbulas e o peneiramento do material, separando-se as frações retidas e passantes na peneira 4,75 mm. As características dos AGRC são apresentadas na Tabela 2, onde observa-se que, apesar da diferença da resistência à compressão do concreto de origem (Tabela 1), os AGRC apresentaram valores próximos para o teor de massa aderida, índice de forma e massa unitária.

Em seguida, os AGRC foram colocados em uma câmara de sazona-mento para equilibrar o teor de umidade das partículas com a umidade relativa do ambiente e evitar a carbonatação natural antes da mineralização do CO_2 . Após essa etapa e com idades de hidratação superiores a 60 dias, os AGRC foram expostos ao

**FIGURA 4**

EXEMPLO DE CURVAS TG/DTG: A) AMOSTRA CARBONATADA; B) AMOSTRA NÃO CARBONATADAS

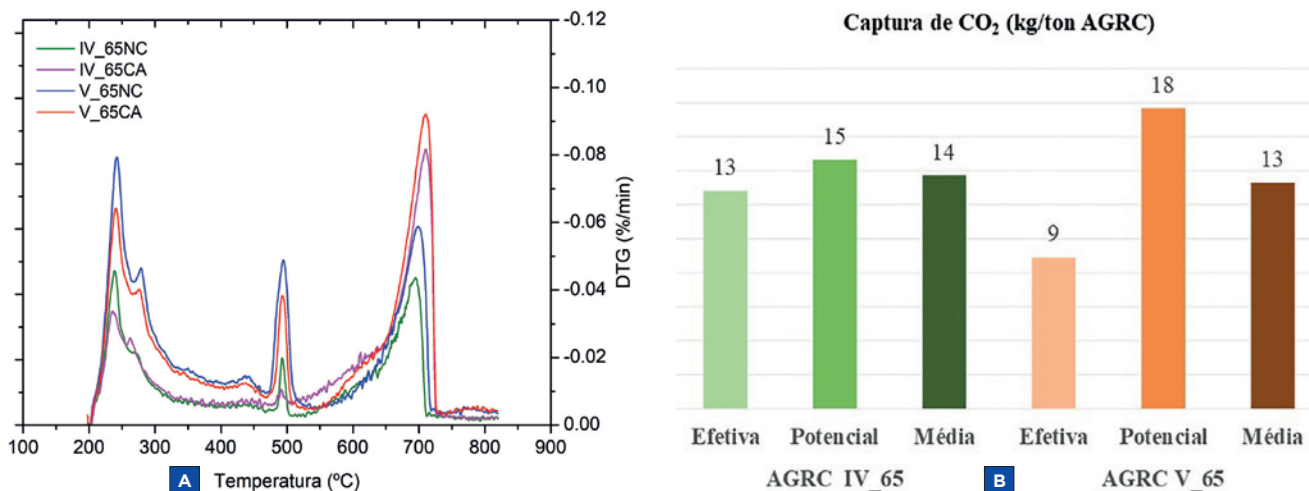


FIGURA 5

CAPTURA DE CO₂ PELOS AGRC: A) CURVAS DTG; B) EFETIVA *versus* POTENCIAL

Fonte: CASSEL (2024)

CO₂ por 24 horas em câmara de carbonatação nas condições: 15 ± 1% de CO₂, 26 ± 1 °C e 65 ± 5% de umidade relativa, conforme esquematizado na Figura 3.

2.2 Determinação da captura de CO₂

Para determinar a captura de CO₂, foram selecionadas 50 gramas da argamassa aderida na superfície dos agregados, antes e após a mineralização de CO₂ por carbonatação acelerada. Aliquotas de 50 mg foram avaliadas por análise termogravimétrica (TG) com fluxo de nitrogênio (30 ml/min), faixa de temperatura (35 - 900 °C) e razão de aquecimento (10 °C/min). Os dados obtidos foram exportados para o software OriginPro 8.5, onde foi realizada a plotagem das curvas TG e DTG (termogravimetria derivada) (Figura 4).

A partir da perda de massa no início e final do pico de decomposição do carbonato de cálcio (CaCO₃) das amostras carbonatadas (TG¹_{CA}-TG²_{CA}) e não carbonatadas (TG³_{NC}-TG⁴_{NC}), que ocorreu na faixa entre 550 °C e 750 °C, por estequiometria, calculou-se a parcela de CO₂ que compõe o CaCO₃ das duas amostras. A quantidade de CO₂ capturado pela matriz cimentícia foi calculada pela diferença da parcela de CO₂ de cada amostra, sendo este valor dividido por 100 e multiplicado pela

massa do material utilizado na análise termogravimétrica (50 mg), conforme Equações 3 e 4.

$$[3] \quad CO_{2cap} = \left(\frac{CO_2 TG_{CA} - CO_2 TG_{NC}}{100} \right) * MCA$$

Onde:

CO_{2cap} = CO₂ capturado (gramas);
 CO₂ TG_{CA} = CO₂ na amostra tratada (%);
 CO₂ TG_{NC} = CO₂ na amostra não tratada (%);
 MCA = Massa inicial da amostra (50 mg).

$$[4] \quad CO_{2cap} \left(\frac{kgCO_2}{t} \right) = \left(\frac{CO_{2cap} (g)}{MCA (g)} \right) * 1000$$

Onde:

CO_{2cap} (kgCO₂/t) = CO₂ capturado (kg-CO₂/t);

CO_{2cap} (g) = CO₂ capturado (gramas);
 MCA (g) = Massa inicial da amostra (50 mg).

Na Figura 5a, são apresentadas as curvas DTG dos AGRC, nas quais pode-se observar que o pico do hidróxido de cálcio (Ca(OH)₂), que ocorre na faixa entre 450 °C e 550 °C, sofreu uma pequena redução nas amostras carbonatadas (CA), indicando que este produto de hidratação não foi totalmente consumido durante as 24 horas de exposição das amostras (CASSEL, 2024). Assim, também foi possível estimar a captura potencial de CO₂ levando em

consideração que toda a argamassa aderida fosse carbonatada (assumiu-se que o hidróxido de cálcio foi totalmente consumido pela reação de carbonatação). Os resultados de captura de CO₂ (efetiva e potencial) para os dois agregados reciclados são mostrados na Figura 5b.

Considerando captura efetiva de CO₂ (Figura 5b), é possível observar que o AGRC.IV_65 apresentou uma captura maior que o AGRC.V_65, respectivamente com os valores de 13 e 9 kg.CO₂ por tonelada de agregado. Esse resultado justifica-se devido à menor resistência do concreto que deu origem ao agregado, o que facilitou a difusão de CO₂, devido à maior porosidade da argamassa aderida ao agregado. Por outro lado, o potencial de captura de CO₂ do AGRC produzido com o CP V ARI é maior devido ao maior teor de hidróxido de cálcio em sua matriz, dado o maior teor de clínquer contido.

Vale ressaltar que os agregados reciclados utilizados neste estudo foram produzidos em laboratório e não apresentam pré-carbonatação. Os agregados advindos de usinas de reciclagem de RCD podem apresentar pré-carbonatação devido à exposição ao CO₂ ambiental durante a vida útil, dependendo das condições de exposição e de contorno e da

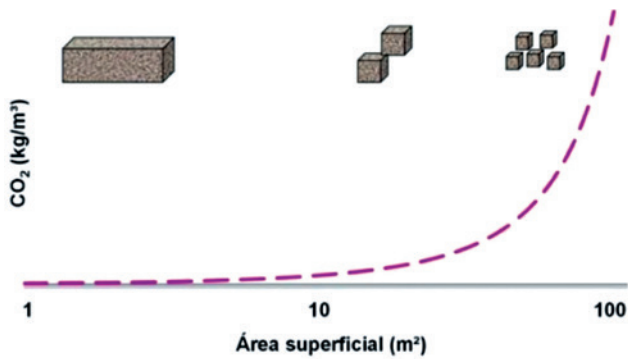


FIGURA 6

CAPTURA DE CO₂ EM FUNÇÃO DA ÁREA SUPERFICIAL DO ELEMENTO

FONTE: FELIX E POSSAN (2018)

relação m²/m³ da estrutura de origem do concreto. Contudo, conforme indicado por Felix e Possan (2018), o maior potencial de captura de CO₂ em matrizes à base de cimento ocorrerá na fase de demolição, se conduzida a produção de agregados reciclados, onde a área superficial que será exposta ao CO₂ é elevada exponencialmente (Figura 6).

Como exemplo, considerando uma viga de dimensões 25 x 40 x 500 cm, a área superficial é de 6,7 m² e, em 50 anos, resultará em um volume carbonatado de aproximadamente 0,15 m³ (para uma espessura de carbonatação de 35 mm e três faces do elemento exposto ao CO₂ sem revestimento ou pintura). Como o volume de concreto empregado para o elemento é de 0,50 m³, se removida a camada de concreto pré-carbonatada durante a vida útil, 70% do material está disponível para ação com CO₂ na fase de agregado reciclado de concreto, em que a elevação da área superficial é mais favorável à fixação do carbono.

Logo, este estudo indica os valores de potencial de captura, ou seja, o máximo valor possível de ser obtido em agregados reciclados de concreto, que é válido para as condições de contorno utilizados no experimento. Para extrapolações, é obrigatória a consideração da pré-carbonatação do RCD assim como a composição físico-química e mineralógica do material e as condições de processo de tratamento com CO₂.

Atenção especial para o tipo de agregado reciclado, pois no resíduo misto a captura de carbono é muito reduzida e infelizmente a maior parte das unidades de reciclagem de RCD não processam separadamente os resíduos mistos de concreto.

-se os dados disponíveis no Relatório de Pesquisa Setorial ABRECON 2022 (ABRECON, 2024), com estimativa de geração brasileira de RCD em 107 milhões de toneladas no ano. Esse indicador não inclui o solo de escavação e considera uma mediana de geração de RCD de 0,5 ton/(habitante.ano). A geração de RCD varia em função da densidade populacional e é gerada de forma diferenciada em cada região do país, sendo tipicamente recebido nas usinas o misto, composto por mistura de produtos cimentícios e cerâmicos. Considerando o índice de reciclagem do RCD em agregados reciclados (AR) de 17% e que 60% dos agregados reciclados produzidos são agregados graúdos (Ø>4,75 mm) (CONTRERAS *et al.*, 2016), na Tabela 3 é apresentada a produção anual de AGRC no Brasil.

3. POTENCIAL DE CAPTURA DE CO₂ NO CENÁRIO NACIONAL

Para simular a potencial captura de CO₂ no cenário nacional, considerou-

TABELA 3

PRODUÇÃO ANUAL DE AGRC NO BRASIL

Região	Produção anual de RCD (toneladas)		Índice de reciclagem (%)	Parcela de agregados graúdos (%)	Produção anual de AGRC (toneladas)
	Total	Concreto			
Norte	9.453.481	311.965	17	60	31.820
Nordeste	28.833.921	2.596.783			264.872
Centro-Oeste	8.353.668	733.034			74.770
Sudeste	44.816.456	4.029.448			411.004
Sul	15.201.294	1.185.701			120.941
Total	106.658.820	8.856.931			903.407

FONTE: ABRECON (2024); CONTRERAS *et al.* (2016)

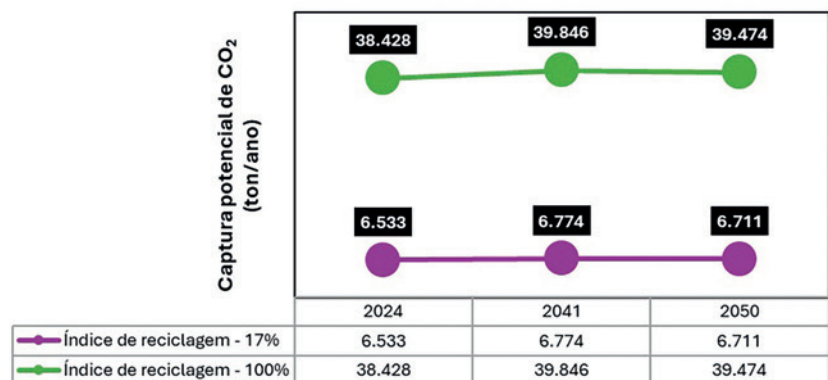


FIGURA 7

POTENCIAL DE CAPTURA DE CO₂ DE ACORDO COM A PROJEÇÃO DE CRESCIMENTO POPULACIONAL ATÉ 2050

FONTE: AUTORES (2024)

Com base na população atual (212.583.750 hab.) e na projeção de crescimento populacional do Brasil para o ano de 2050 (218.369.418 hab.) (IBGE, 2024), foi realizada a estimativa do potencial de captura de CO₂ dos AGRC em 2050, considerando: (i) a relação de produção de AGRC por habitante; (ii) o índice de reciclagem atual (17%) e o ideal (100%); e (iii) o valor potencial de captura de CO₂ pelos AGRC (Figura 5b) considerando a média obtida entre os dois AGRC (-17 kgCO₂/ton). Esta análise incluiu também o ano de 2041, quando a população do Brasil deverá alcançar o seu maior número (220.425.299 hab.), e está apresentada no gráfico da Figura 7.

Considerando as metas de redução das emissões globais de CO₂ para alcançar o Net Zero até 2050, o mercado brasileiro de agregados graúdos reciclados de concreto tem o potencial de contribuir, em média, com a captura de 39,5 ktCO₂/ano, a partir do aprimoramento da mineralização do CO₂ como forma de obter a carbonatação completa do material.

Diante deste valor e do volume de resíduo de concreto produzido anualmen-

te, o mercado de agregados reciclados pode ser avaliado como uma possibilidade de atuação no mercado de carbono, onde empresas com dificuldade para reduzir suas emissões de CO₂ compram créditos de carbono de empresas mais sustentáveis, como forma de incentivo econômico para diminuir o impacto ambiental das indústrias.

4. CONCLUSÕES


Neste estudo avaliou-se a estimativa do potencial de captura de CO₂ em agregados graúdos reciclados de concreto, considerando a produção anual de resíduos no Brasil. Constatou-se que o aumento do índice de reciclagem dos resíduos de construção e demolição associado à mineralização completa das partículas com CO₂ pode elevar a contribuição dos agregados reciclados às metas globais de Net Zero, com adicional relevância ao mercado de carbono.

Verificou-se que a composição dos concretos que dá origem aos agregados graúdos reciclados tem influência no potencial e na captura efetiva de CO₂ após o processo de mineralização.

Parâmetros como a porosidade da matriz cimentícia e a composição química do cimento influenciam na difusão de CO₂ e na quantidade de produtos de hidratação, como o hidróxido de cálcio, disponível para reagir e capturar CO₂. Neste caso, as melhores condições de processamento para a mineralização podem variar conforme as características do concreto antigo.

A fração fina ($\varnothing < 4,75$ mm) e pós ($\varnothing < 0,15$ mm), devido à maior área superficial das partículas e maior teor de materiais cimentícios residuais, também possuem potencial de captura de CO₂, e devem ser levados em consideração como forma de avaliar a contribuição do setor na redução das emissões de CO₂ da indústria da construção civil.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) e à Universidade Federal da Integração Latino-Americana (UNILA) pelo suporte laboratorial, ao Instituto Federal do Paraná (IFPR) e ao CNPq pelo fomento à pesquisa (processos 308511/2022-0 e 407060/2021-90). 

▶ REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA PARA RECICLAGEM DE RESÍDUOS DA CONSTRUÇÃO CIVIL - ABRECON. Pesquisa Setorial Abrecon 2022. 2024. Disponível em: <<https://abrecon.org.br/pesquisa>>.
- [2] BRASIL, MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÕES - MCTI. Estimativas anuais de emissões de gases de efeito estufa no Brasil. 6.ed. 2022. Disponível em:<<https://repositorio.mcti.gov.br/handle/mctic/4966>>.
- [3] CASSEL, V. S. Tratamento com uso de CO₂ de agregados graúdos reciclados de concretos controlados: propriedades microestruturais e captura de CO₂. 2024. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Construção e Infraestrutura, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2024.
- [4] CONTRERAS, M. *et al.* Recycling of construction and demolition waste for producing new construction material (Brazil case-study). *Construction and Building Material*, v. 123, p. 594-600, 2016.
- [5] FELIX, E. F. POSSAN, E. Balanço das emissões e da captura de CO₂ em estruturas de concreto: simulação em função do consumo e tipo de cimento. *Revista Ibracon de Estruturas e Materiais*. 2018. <http://dx.doi.org/10.1590/S1983-41952018000100008>
- [6] GLOBAL CCS INSTITUTE. Global Status of CCS 2023, 2023. Disponível em: <<https://status23.globalccsinstitute.com/>>.
- [7] INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. Projeções da População. 2024. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/estatisticas/sociais/populacao/9109-projecao-da-populacao.html>>.
- [8] INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE - IPCC. Climate Change 2022. Mitigation of climate change. Cambridge University Press, 2022. Disponível em: <<https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg2/>>.
- [9] INTERNATIONAL ENERGY AGENCY - IEA. Net Zero by 2050: A Roadmap for the Global Energy Sector. International Energy Agency, 2021. Disponível em: <<https://www.iea.org/reports/net-zero-by-2050>>.
- [10] MASCOLO, Rafael. Avaliação do espaçador da armadura como ponto de entrada de agentes agressivos: estudo da influência na durabilidade do concreto armado. 2023. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Construção e Infraestrutura, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2023.
- [11] POON, C. S. *et al.* Total recycling of concrete waste using accelerated carbonation: A review. *Cement and Concrete Research*, v. 173, p. 107284, 2023.
- [12] XUAN, D.; ZHAN, B.; POON, C. S. Assessment of mechanical properties of concrete incorporating carbonated recycled concrete aggregates. *Cement and Concrete Composites*, v. 65, p. 67-74, 2016.