

Resíduos cimentícios carbonatados: aplicações como adições

ERIC JOSEPH GALLI MARKUS - TÉCNICO - <https://orcid.org/0009-0008-8748-279X> - (eric.markus@maua.br) ;
GIOVANA ATAMANTCHUK - ESTUDANTE - <https://orcid.org/0009-0006-6635-3935> - (giatamantchuk@gmail.com) ;
MATEUS ZANOVELLO - PROFESSOR - <https://orcid.org/0000-0003-0479-6045> - (mateus.oliveira@maua.br) – IMT

RESUMO

TECNOLOGIAS DE CAPTURA, ARMAZENAMENTO E UTILIZAÇÃO DE CARBONO (CCUS) TÊM SIDO INVESTIGADAS COMO ESTRATÉGIAS PARA REDUZIR AS EMISSÕES DA INDÚSTRIA CIMENTEIRA, DESTACANDO-SE A CARBONATAÇÃO DE RESÍDUOS CIMENTÍCIOS PELA CAPACIDADE DE MINERALIZAR CO₂ NA FORMA DE CARBONATOS ESTÁVEIS. ESTE ESTUDO AVALIOU TRÊS MÉTODOS DE CARBONATAÇÃO APLICADOS A RESÍDUOS DE PASTA CIMENTÍCIA: NATURAL ACELERADA, FORÇADA EM MEIO AQUOSO E FORÇADA EM MEIO AQUOSO SOB PRESSÃO E CONTROLE DE PH. OS MATERIAIS CARBONATADOS FORAM MOÍDOS E UTILIZADOS COMO MATERIAIS CIMENTÍCIOS SUPLEMENTARES (MCSs), SUBSTITUINDO 20% DO CLÍNQUER. O DESEMPENHO FOI AVALIADO POR RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO EM PASTAS, COM ESTIMATIVAS PARA ARGAMASSA, E CÁLCULO DAS EMISSÕES E INTENSI-

DADE DE CARBONO. OS RESULTADOS DEMONSTRAM QUE RESÍDUOS CIMENTÍCIOS CARBONATADOS SÃO VIÁVEIS COMO MCSs, COM DESEMPENHO MECÂNICO COMPARÁVEL AO DE CIMENTOS COMERCIAIS E MENOR INTENSIDADE DE CO₂, DESTACANDO-SE ESPECIALMENTE COMO ALTERNATIVA MAIS SUSTENTÁVEL AO FÍLER CALCÁRIO.

PALAVRAS-CHAVE: CCUS, MCS, CARBONATAÇÃO, ECONOMIA CIRCULAR.

1. INTRODUÇÃO

A captura, utilização e armazenamento de carbono (CCUS) apresenta-se como a principal estratégia para mitigação das emissões de CO₂ na construção civil (GCCA, 2024). Nesse contexto, a carbonatação de resíduos cimentícios destaca-se como um processo capaz de

mineralizar CO₂ por meio da formação de carbonato de cálcio (CaCO₃) e gel sílico-aluminoso, resultantes da reação entre CaO e CO₂ (WINNEFELD *et al.*, 2022). Diferentes rotas têm sido exploradas, incluindo carbonatação natural, natural-acelerada, em meio aquoso com injeção de CO₂ - sendo esta última caracterizada por maior reatividade e grau de carbonatação (TEUNE *et al.*, 2023; ZAJAC *et al.*, 2023).

A carbonatação de resíduos cimentícios gera produtos com potencial como materiais cimentícios suplementares (MCSs), combinando efeito fíler (CaCO₃) e atividade pozolânica (gel sílico-aluminoso), contribuindo para a redução do teor de clínquer e para uma economia circular na construção (MAO *et al.*, 2024). No entanto, o aumento da área superficial desses materiais pode impactar a demanda de água, aspecto pouco explorado e compreendido na literatura, porém muito relevante para sua aplicação.

Este estudo avalia o uso de subprodutos carbonatados de pasta de cimento como MCSs em cimentos compostos com 20% de substituição de clínquer, comparáveis ao CP II-F. Foram investigados processos de carbonatação natural e aquosa (pressurizada e não pressurizada). O desempenho foi analisado por resistência à compressão e intensidade de CO₂, permitindo correlacionar desempenho e impacto ambiental, em comparação com cimentos comerciais (CP II-Z e CP IV) (ABRÃO; CARDOSO; JOHN, 2020).

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Foi utilizado cimento Portland do tipo CPV-ARI (CPV), devido ao seu elevado teor de clínquer (>90%).

Os subprodutos carbonatados foram

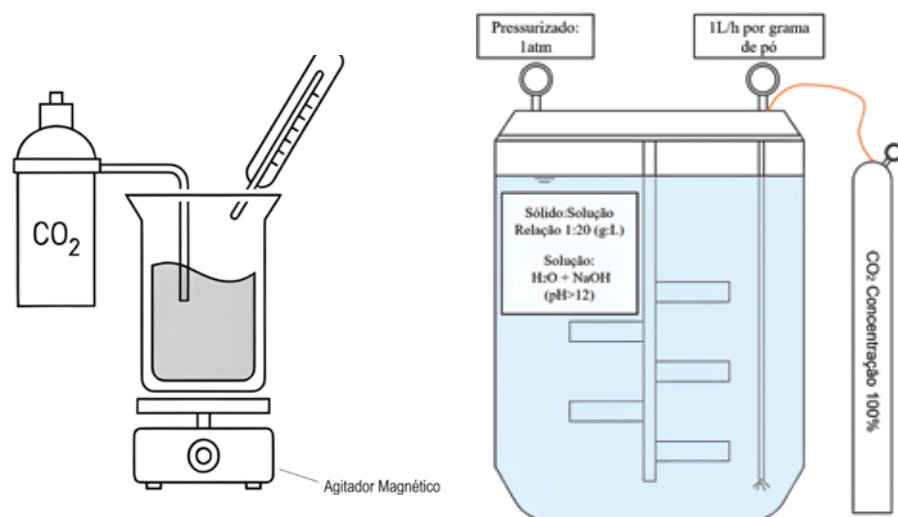


FIGURA 1

RASCUNHO DOS PROCEDIMENTOS DE CARBONATAÇÃO cPCH_A (ESQUERDA) E cPCH_P (DIREITA)

FONTE: AUTORES PRÓPRIOS (2026)

obtidos a partir de uma pasta de CPV com relação água/cimento (a/c) de 0,50, curada por 28 dias e, posteriormente, moída abaixo de 150µm, resultando no material denominado pasta de cimento hidratada (PCH). Esse material foi submetido a três métodos de carbonatação.

O primeiro método, carbonatação natural acelerada, foi realizado em câmara climática a 20°C, umidade relativa de 70-80% e concentração de CO₂ de 10%, até estabilização da absorção (-30 dias), conforme Neves, Branco e De Brito (2013). O material obtido foi denominado cPCH_n.

O segundo método consistiu na carbonatação em meio aquoso (cPCH_a), por meio da dispersão do pó de PCH em água (relação sólido/líquido de 1:20), com injeção contínua de CO₂ (100%) sob agitação constante em agitador magnético.

O terceiro método, também em meio aquoso, foi conduzido em sistema pressurizado (cPCH_p). O PCH foi disperso em solução de água e NaOH (1:20), com controle de pH entre 12 e 14, seguido da injeção de CO₂ (100%) a uma vazão de 1 L/h por grama de material, durante 6 horas, com agitação contínua.

Após os processos, os materiais carbonatados foram secos à temperatura ambiente por 48 h. A Figura 1 apresenta os sistemas utilizados para obtenção de cPCH_a (à esquerda) e cPCH_p (à direita).

2.1 Caracterização de materiais

A massa específica das partículas (ρ) foi obtida por picnômetro de hélio (FAPESP EMU 2021/04848-0). A área superficial específica dos materiais (SSA_{BET}) foi determinada por adsorção de N₂ (método BET). A porosidade dos grãos foi determinada por porosimetria por intrusão de mercúrio (MIP).

O teor de saturação de superplastificante (SP) foi determinado experimentalmente a partir da definição da água de ponto de virada (relação a/s) e da avaliação do espalhamento em ensaio de mini-slump. Diferentes teores de SP foram testados até a obtenção de espalhamento máximo e estável, sendo o teor mínimo correspondente definido como teor de saturação. Os resultados de caracterização são apresentados na Tabela 1.

As análises termogravimétricas (TG)

TABELA 1

PROPRIEDADES FÍSICAS DOS MATERIAIS UTILIZADOS

Parâmetros	CPV	cPCH_n	cPCH_a	cPCH_p	FC
ρ (g/cm ³)	3.06	2.57	2.59	2.64	2.73
SSABET (m ² /g)	1.64	26.06	39.54	60.12	5.85
Porosidade do grão - MIP (%)	—	37.02	47.89	67.05	—
Água de ponto de virada (a/s)	0.27	0.40	0.40	0.40	0.30
Saturação de SP (%)	0.55	0.45	0.45	0.45	0.20

FONTE: AUTORES PRÓPRIOS (2026)

TABELA 2

PF E COMPOSIÇÃO DE ÓXIDOS DA PASTA DE CIMENTO ENDURECIDA (PCH)

XRF (%)	PF	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	SO ₃	Fe ₂ O ₃	Outros
PCH	31.57	51.76	9.05	2.04	0.24	1.75	2.87	0.72

FONTE: AUTORES PRÓPRIOS (2026)

foram realizadas em equipamento TGA Q50 (TA Instruments), na faixa de 20 a 1000 °C, com taxa de 10°C/min.

A composição química do PCH foi determinada por fluorescência de raios X (XRF), sem padrão. As amostras foram previamente submetidas à perda ao fogo (PF) a 1000 °C por 12 h. Resultados são exibidos na Tabela 2.

2.2 Grau de carbonatação

A eficiência dos processos de carbonatação (grau de carbonatação) foi estimada a partir das Equações 1-2. O teor de CaCO₃ (M_{CaCO₃}, % em massa) foi determinado por análise termogravimétrica (TGA) do PCH (TEUNE *et al.*, 2023). As massas molares adotadas foram 100,09 g/mol para CaCO₃ e 56,08 g/mol para CaO, enquanto o teor de CaO na pasta hidratada (M_{CaO^{HCP}}) foi obtido por XRF (Tabela 2).

[1]

$$\text{Grau de Carbonatação (\%)} = \frac{M_{CaCO_3 \text{ amostra}}}{M_{CaCO_3 \text{ calculado}}} \cdot 100\%$$

[2]

$$CaCO_3 \text{ calculado} = \frac{M_{CaO^{HCP}} \cdot Mm_{CaCO_3}}{Mm_{CaO}}$$

2.3 Caracterização de pastas

As pastas experimentais foram formuladas com 20% de substituição de clínquer, utilizando o teor de saturação de superplastificante (SP) e a quantidade mínima de água necessária para atingir consistência de 100 mm no ensaio de mini-slump. A composição das misturas é apresentada na Tabela 3. O aditivo utilizado nas pastas foi um superplastificante tipo II.

A resistência à compressão foi avaliada em corpos de prova cúbicos (25 mm

TABELA 3

COMPOSIÇÃO DE PASTAS EXPERIMENTAIS

Pastas	Ligantes	a/s (g/g)	SP (%)
CPV	100% CPV	0.29	0.26
20c n	80% CPV + 20% cPCH_n	0.29	0.36
20c a	80% CPV + 20% cPCH_a	0.29	0.36
20c p	80% CPV + 20% cPCH_p	0.29	0.36
20FC	80% CPV + 20% FC	0.29	0.29

FONTE: AUTORES PRÓPRIOS (2026)

de aresta) aos 7 e 28 dias, utilizando máquina Instron EMIC 23-50, com velocidade de carregamento de 0,02 mm/s. Para cada mistura, foram ensaiados quatro corpos de prova. Os resultados foram correlacionados com ensaios em cilindros de argamassa (50 × 100 mm), preparados com pasta e argamassa padrão de CPV (a/c = 0,48), avaliados aos 7, 28, 49 e 91 dias.

As análises termogravimétricas (TG) foram realizadas aos 1 e 7 dias. As amostras foram previamente submetidas à troca de solvente para interrupção da hidratação, conforme Snellings *et al.* (2018).

2.4 Análise ambiental

A pegada de CO₂ das matérias-primas e sua origem são apresentadas na Tabela 4. Para os materiais carbonatados, considerou-se a capacidade de captura de até 400 kgCO₂/t de PCH a 100% de carbonatação (HUNTZINGER *et al.*, 2009), sendo a pegada de CO₂ calculada conforme a Equação 3 (Tabela 4). As emissões associadas aos agregados foram desprezadas. Para o aditivo superplastificante, utilizou-se a relação 2 kgCO₂/kg de aditivo.

$$[3] \quad cHPC \text{ CO}_2 \text{ emissões} = 400 \cdot \text{Grau de carbonatação (\%)}$$

As emissões de CO₂ de 1 m³ de argamassa padrão foram determinadas conforme a Equação 4, considerando as contribuições do clínquer (CPV), dos materiais cimentícios suplementares (MSCs) e superplastificante (SP).

$$[4] \quad CO_{2argamassa} = CO_{2CPV} + CO_{2MSCs} + CO_{2SP} + CO_{2areia}$$

TABELA 4

COMPOSIÇÃO DE PASTAS EXPERIMENTAIS

Material	Emissões de CO ₂ (kgCO ₂ /ton)	Referência
CPV	863	(MILLER <i>et al.</i> , 2018)
FC	8	(MILLER <i>et al.</i> , 2018)
cPCH_n	-198	Equação 5 e Tabela 5
cPCH_a	-265	Equação 5 e Tabela 5
cPCH_p	-302	Equação 5 e Tabela 5

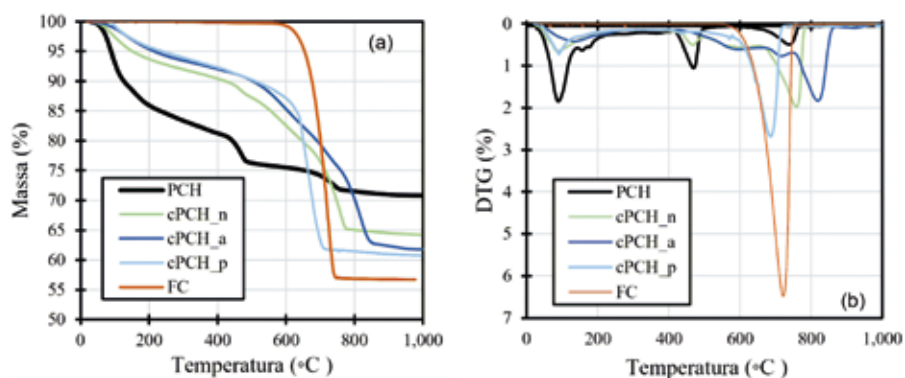


FIGURA 2

TG (A) E DTG (B) DE PCH, LF E cPCHs EXPERIMENTAIS

FONTE: AUTORES PRÓPRIOS (2026)

A eficiência ambiental foi avaliada por meio do índice de intensidade de CO₂ (Equação 5), expresso em kgCO₂ · m⁻³ · MPa⁻¹, que relaciona as emissões totais da argamassa padrão (1:3) por resistência à compressão estimada. Esse indicador permite integrar desempenho mecânico e impacto ambiental em uma mesma métrica, sendo particularmente relevante para comparação entre sistemas com diferentes teores de substituição de clínquer. Para os cálculos, foi adotada massa específica do agregado igual a 2,65 g/cm³.

$$[5] \quad CO_{2intensidade} = \frac{CO_{2argamassa}}{fargamassa}$$

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 Grau de carbonatação

As curvas de TG (a) e DTG (b) apresentadas na Figura 2 evidenciam perdas de massa significativas na faixa de 600–800 °C, atribuídas à decomposição de carbonato de cálcio (CaCO₃) formado durante o processo de carbonatação. A análise da DTG indica que a amostra cPCH_p apresenta ausência de portlandita (Ca(OH)₂), evidenciando conversão praticamente completa dessa fase em CaCO₃ no processo de carbonatação aquosa pressurizada, enquanto pequenas frações de C-S-H permanecem não carbonatadas. Em contraste, as amostras cPCH_n e cPCH_a apresentam picos residuais de portlandita

e C-S-H, indicando carbonatação parcial e potencial de evolução sob condições mais severas.

Os graus de carbonatação (Tabela 5), determinados conforme a Equação 5, corroboram esses resultados, evidenciando maior eficiência do método aquoso pressurizado (75,53%), seguido do método aquoso (66,15%) e da carbonatação natural acelerada (49,45%). A Figura 3 apresenta a relação entre a área superficial específica (BET) e o grau de carbonatação, revelando uma tendência exponencial consistente com as transformações químicas envolvidas na carbonatação de PCH (TEUNE *et al.*, 2023). Esse comportamento está atrelado à dissolução das fases de portlandita (CH) e silicatos de cálcio hidratados (C-S-H) na formação de carbonato de cálcio (CaCO₃) durante o processo de carbonatação. Logo, maiores graus de carbonatação estão associados ao aumento da área superficial, o que pode elevar a demanda de água quando esses materiais são utilizados como MCSs.

TABELA 5

GRAUS DE CARBONATAÇÃO DOS cPCHs EXPERIMENTAIS

Carbonatado	Grau de carbonatação (%)
cPCH_n	49,45
cPCH_a	66,15
cPCH_p	75,53

FONTE: AUTORES PRÓPRIOS (2026)

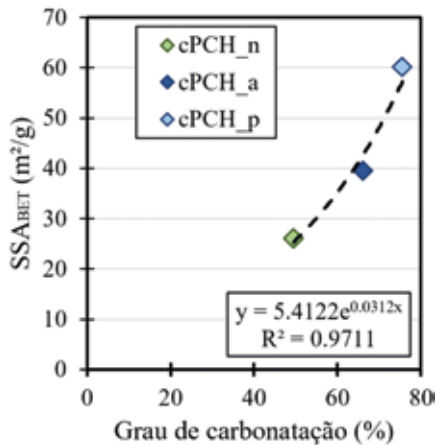


FIGURA 3

ÁREA SUPERFICIAL ESPECÍFICA (SSABET) PELO GRAU DE CARBONATAÇÃO

FONTE: AUTORES PRÓPRIOS (2026)

3.2 Resistência à compressão

A Figura 4 apresenta a relação entre a resistência à compressão de pastas e argamassas de CPV. Os valores convertidos são apresentados na Figura 5, que reúne as resistências das pastas cúbicas, sua conversão para argamassa padrão e a comparação com dados da literatura (ABRÃO; CARDOSO; JOHN, 2020).

As misturas 20c_a e 20FC apresentaram resistências equivalentes ao CPV, enquanto 20c_n e 20c_p exibiram desempenho ligeiramente inferior, evidenciando que os parâmetros de carbonatação influenciam diretamente a reatividade residual dos materiais. Esse comportamento indica que a conversão das fases cimentícias durante a carbonatação, embora favoreça a formação de carbonatos estáveis, pode reduzir a disponibilidade de espécies reativas para reações posteriores de hidratação, limitando a formação adicional de produtos como C-(A)-S-H e, consequentemente, o desenvolvimento da resistência.

Apesar disso, os ligantes contendo finos carbonatados apresentaram desempenho comparável ao de cimentos comerciais brasileiros, indicando comportamento típico de sistemas governados pelo efeito filler, associado a contribuição reativa moderada. Considerando o nível de substituição de 20%, equivalente ao cimento

CP II-F, os resultados demonstram que os cPCHs podem atuar como MCSs viáveis e, devido à captura de carbono durante o processo de carbonatação, configuram uma alternativa com menor pegada ambiental em comparação ao filler calcário.

3.3 Análise ambiental

A Figura 6 apresenta as emissões de CO₂ por tonelada de ligante e por metro cúbico de argamassa padrão, incluindo a fração de CO₂ capturada pelos materiais carbonatados em função do grau de carbonatação. Todos os cimentos compostos apresentaram emissões inferiores às do CPV, refletindo a redução do teor de clínquer. No entanto, as misturas contendo cPCH destacam-se pela presença de emissões

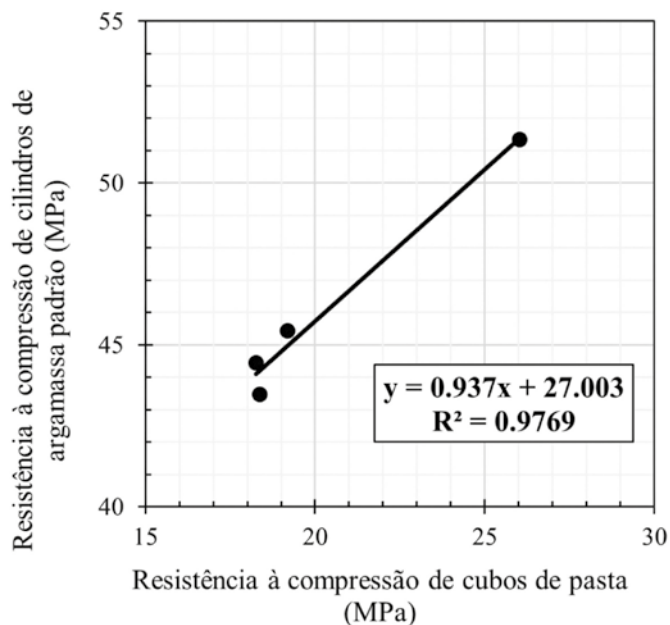


FIGURA 4

CORRELAÇÃO ENTRE CUBOS DE PASTA (25 MM) E CILINDROS DE ARGAMASSA (50×100 MM)

FONTE: AUTORES PRÓPRIOS (2026)

negativas associadas à captura de CO₂ durante a carbonatação. Esse efeito resulta em emissões líquidas inferiores à da mistura com filler calcário (20FC), com reduções de 6-9% das emissões de CO₂ por tonelada de ligante, variando de acordo com o grau de carbonatação

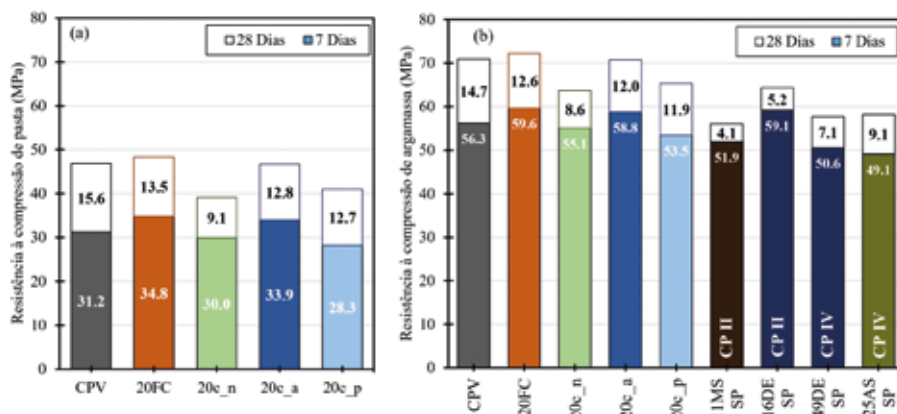


FIGURA 5

RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DE CUBOS DE PASTA (25 MM) (A) E RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO ESTIMADA DE CILINDROS DE ARGAMASSA (50 × 100 MM) (B), AOS 7 E 28 DIAS. DADOS NÃO EXPERIMENTAIS RETIRADOS DE ABRÃO; CARDOSO; JOHN (2020)

FONTE: AUTORES PRÓPRIOS (2026)

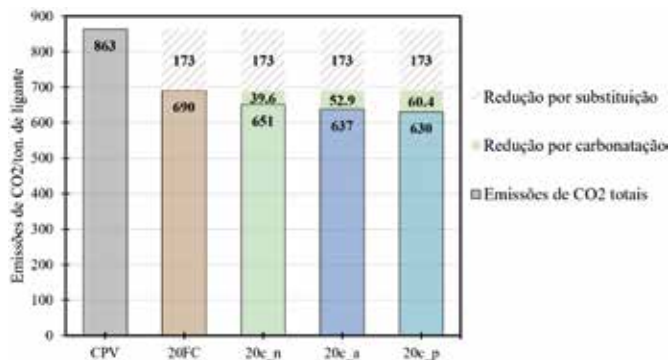


FIGURA 6

EMISSIONES DE CO₂ POR TONELADA DE LIGANTE UTILIZADA NA MISTURA, DIFERENÇA ENTRE AS EMISSIONES DAS MISTURAS COM CPV E A PARCELA DE CO₂ POR TONELADA DE LIGANTE CAPTURADA NOS PROCESSOS DE CARBONATAÇÃO

FONTE: AUTORES PRÓPRIOS (2026)

atingido. Esses resultados evidenciam o potencial dos materiais carbonatados como MCSs para ampliar a redução de emissões além da substituição do clínquer, destacando também a necessidade de otimizar os processos de carbonatação para alcançar maiores graus de carbonatação.

A Figura 7 apresenta as emissões de CO₂ por tonelada de ligante em conjunto com a intensidade de CO₂ (CI), em função da resistência à compressão estimada aos 28 dias, incluindo dados da literatura (ABRÃO; CARDOSO; JOHN, 2020). Entre as misturas de carbonatados, a mistura 20c_a apresentou menor CI que todos os cimentos compostos em análise, somente com exceção ao 49DE SP devido seu maior grau de substituição. As misturas contendo cPCH estão entre os menores valores de CI, demonstrando a eficiência ambiental desse material como MCS. Em comparação ao filer calcário (20FC), todos os carbonatados atingiram menores valores de CI com desempenho mecânico semelhante. Isso implica que o cPCH é um MCS mais ambientalmente eficiente que o filer calcário, possivelmente servindo como uma alternativa mais sustentável ao filer calcário.

4. CONCLUSÕES

Este estudo avaliou o desempenho mecânico e ambiental de cimentos

compostos com 20% de substituição por materiais cimentícios suplementares (MCSs), utilizando subprodutos carbonatados de pasta de cimento hidratada (cPCH). Os resultados foram comparados ao CPV-ARI, ao cimento com filer calcário (CP II-F) e a dados da literatura para cimentos compostos comerciais (CP II-Z e CP IV). Todas as misturas foram formuladas com teor de água constante e ajuste do superplastificante para atingir consistência equivalente. Observou-se que misturas contendo cPCH obtido por carbonatação em meio aquoso apresentaram desempenho mecânico comparável ao CPV-ARI e ao CP II-F, ao mesmo tempo em que demonstraram menores emissões de CO₂. A partir dos resultados, destacam-se as seguintes conclusões:

► **Desempenho mecânico e reatividade:** Os cPCHs obtidos por carbonatação em meio aquoso apresentaram resistência à compressão aos 28 dias semelhante ao CP II-F (diferença ~2%), indicando que esses materiais podem atuar como MCSs viáveis. No entanto, o desempenho está diretamente associado ao grau de carbonatação e à preservação de fases potencialmente reativas, indicando a necessidade de otimização dos

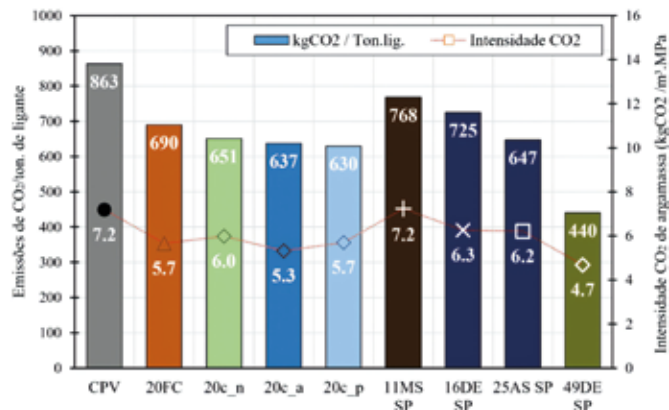


FIGURA 7

EMISSIONE DE CO₂ POR TONELADA DE LIGANTE EM CONJUNTO COM INTENSIDADE DE CO₂ EM FUNÇÃO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO ESTIMADA DE CILINDROS DE ARGAMASSA (50 × 100 MM) AOS 28 DIAS DE IDADE. DADOS DA LITERATURA DAS ARGAMASSAS 11MS SP, 25AS SP, 16DE SP E 49DE SP DE ABRÃO; CARDOSO; JOHN (2020). MS CORRESPONDE À ESCÓRIA DE MANGANÊS, AS À ESCÓRIA ÁCIDA E DE À TERRA DIATOMÁCEA

FONTE: AUTORES PRÓPRIOS (2026)

parâmetros de carbonatação para maximizar a eficiência reativa.

- **Relação entre carbonatação e propriedades físicas:** Observou-se uma correlação exponencial entre o grau de carbonatação e a área superficial dos cPCHs, devido a dissolução de fases de portlandita (CH) e silicatos de cálcio hidratado (C-S-H) na formação de carbonato de cálcio (CaCO₃). Isso implica um aumento na demanda de água ao utilizar este material como MCS. Esse efeito pode ser mitigado pelo uso de superplastificantes, cujas emissões associadas são desprezíveis em comparação ao CO₂ capturado, preservando a viabilidade ambiental do sistema.
- **Eficiência ambiental:** As misturas com cPCH alcançam reduções de 6% a 9% nas emissões de CO₂ em relação ao CP II-F, variando conforme o grau de carbonatação de cada material. Considerando o desempenho mecânico semelhante entre eles, a menor pegada ambiental dos cPCHs evidencia o potencial dos carbonatados como alternativa superior ao filer calcário como MCS. ☺

▶ REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] ABRÃO, Pedro Cesar R.A.; CARDOSO, Fábio A.; JOHN, Vanderley M. Efficiency of Portland-pozzolana cements: Water demand, chemical reactivity and environmental impact. *Construction and Building Materials*, vol. 247, 30 Jun. 2020.
- [2] GLOBAL CEMENT AND CONCRETE ASSOCIATION (GCCA). *Cement and Concrete Industry Net Zero Progress Report 2024/25*. London: GCCA, 2024.
- [3] HUNTZINGER, Deborah N.; GIERKE, John S.; KAWATRA, S. Komar; EISELE, Timothy C.; SUTTER, Lawrence L. Carbon Dioxide Sequestration in Cement Kiln Dust through Mineral Carbonation. *Environmental Science & Technology*, vol. 43, no. 6, p. 1986-1992, 15 Mar. 2009.
- [4] MAO, Yuguang et al. Quantifying the effects of wet carbonated recycled cement paste powder on the properties of cement paste. *Cement and Concrete Research*, v. 175, p. 107381, 2024.
- [5] MILLER, Sabbie A.; JOHN, Vanderley M.; PACCA, Sergio A.; HORVATH, Arpad. Carbon dioxide reduction potential in the global cement industry by 2050. *Cement and Concrete Research*, vol. 114, p. 115-124, 1 Dec. 2018.
- [6] NEVES, R.; BRANCO, F.; DE BRITO, J. Field assessment of the relationship between natural and accelerated concrete carbonation resistance. *Cement and Concrete Composites*, vol. 41, p. 9-15, 2013.
- [7] SNELLINGS, Ruben; et al. RILEM TC-238 SCM recommendation on hydration stoppage by solvent exchange for the study of hydrate assemblages. *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, vol. 51, no. 6, 1 Dec. 2018.
- [8] TEUNE, I.E.; SCHOLLBACH, K.; FLOREA, M.V.A.; BROUWERS, H.J.H. Carbonation of hydrated cement: The impact of carbonation conditions on CO₂ sequestration, phase formation, and reactivity. *Journal of Building Engineering*, vol. 79, p. 107785, Nov. 2023b.
- [9] WINNEFELD, Frank; LEEMANN, Andreas; GERMAN, Alexander; LOTHENBACH, Barbara. CO₂ storage in cement and concrete by mineral carbonation. *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry*, vol. 38, p. 100672, Dec. 2022.
- [10] ZAJAC, Maciej et al. Enforced carbonation of cementitious materials. *Cement and Concrete Research*, v. 174, p. 107285, 2023.

O FUTURO DA CONSTRUÇÃO JÁ ESTÁ EM OBRA

Enquanto o mercado fala sobre inovação, a Apodi Expert desenvolve tecnologias que já estão transformando a engenharia do Brasil.

 **Concreto 100 MPa**

 **Desenvolvimento Contínuo**

 **Alta Performance**

 **Engenharia Especializada**

 **Soluções Técnicas**

 **Pesquisa Aplicada**

Accesse o nosso site



@apodiexpert



@agenciaplug

apodi CIMENTO | expert