XXI ENTAC – Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído
14 a 16 de outubro de 2026 | Goiânia-Brasil
DOI: https://doi.org/10.46421/entac.v21i1.8375

Avaliação numérica do efeito da mineralogia de MCS no comportamento elástico de corpos de prova submetidos à carbonatação acelerada

Numerical evaluation of the effect of MCS mineralogy on the elastic behavior of specimens subjected to accelerated carbonation

RODRIGUES, Ana Luiza de Moura
Instituto Tecgraf/PUC-Rio | Rio de Janeiro | Brasil | analuiza@tecgraf.puc-rio.br
ROEHL, Deane
Instituto Tecgraf/PUC-Rio | Rio de Janeiro | Brasil | deane@tecgraf.puc-rio.br
CONGRO, Marcello
Instituto Tecgraf/PUC-Rio | Rio de Janeiro | Brasil | marcellocongro@tecgraf.puc-rio.br
SOUZA, Lourdes Maria Silva de
Instituto Tecgraf/PUC-Rio | Rio de Janeiro | Brasil | lmsilvadesouza@tecgraf.puc-rio.br

Resumo

A carbonatação acelerada destaca-se como técnica de CCUS por permitir a mineralização de CO_2 em materiais com alto teor de óxido de cálcio, maximizando a precipitação de carbonato de cálcio em ambientes com alta concentração desse gás. O estudo mapeou tensões em regiões críticas de corpos de prova submetidos a diferentes graus de carbonatação acelerada, avaliando o efeito da mineralogia em cada caso. A modelagem numérica no *Abaqus*, com propriedades elásticas extraídas da literatura, indicou que materiais cimentícios suplementares podem densificar a camada superficial e limitar a difusão de CO_2 para o interior da estrutura. A integração entre modelagem e ensaios experimentais mostrou-se promissora para a previsão de novos materiais e o avanço sustentável da construção civil.

Palavras-chave: Materiais cimentícios suplementares. Mineralização de carbono. Carbonatação acelerada. Método dos Elementos Finitos. Modelagem numérica.

Abstract

Accelerated carbonation stands out as a CCUS technique for enabling CO_2 mineralization in materials with high calcium oxide content, maximizing calcium carbonate precipitation in environments with high CO_2 concentration. The study mapped stresses in critical regions of specimens subjected to different degrees of accelerated carbonation, evaluating the effect of mineralogy in each case. Numerical modeling in Abaqus, with elastic properties extracted from the literature, indicated that supplementary cementitious materials can densify the surface layer and limit CO_2 diffusion into the structure interior. The integration of numerical modeling and experimental testing proved promising for predicting properties of new materials and the sustainable advancement of the construction industry.

Keywords: Supplementary cementitious materials. Carbon mineralization. Accelerated carbonation. Finite Element Method. Numerical modeling.

Como citar:
RODRIGUES, A. L. M; ROEHL, D; CONGRO, M; SOUZA, L. M. S. Avaliação numérica do efeito da mineralogia de MCS no comportamento elástico de corpos de prova submetidos à carbonatação acelerada. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 21, 2026, Goiânia. **Anais**... Goiânia: ANTAC, 2026.

DOI: https://doi.org/10.46421/entac.v21i1.8375

INTRODUÇÃO

Durante a 21ª Conferência das Partes, o Acordo de Paris estabeleceu o limite de 1,5°C de aquecimento global acima dos níveis pré-industriais [1]; contudo, esse limiar foi atingido em 2024, segundo o IPCC [2]. O CO_2, responsável por mais da metade das emissões de gases de efeito estufa [3], tem na indústria cimenteira uma fonte relevante, com 8% das emissões antropogênicas [4]. Nesse cenário, estratégias de Captura, Uso e Armazenamento de Carbono (CCUS) tornaram-se essenciais, sendo a carbonatação acelerada uma das mais promissoras por mineralizar CO_2 em materiais ricos em óxido de cálcio, como o cimento Portland e os materiais cimentícios suplementares (MCS), na forma de carbonatos estáveis.

Materiais ricos em óxido de cálcio, como cimento Portland e MCS, são candidatos ideais para a carbonatação acelerada. O uso de MCS nesse processo reincorpora subprodutos industriais na cadeia produtiva e reduz a quantidade de cimento Portland necessária. Embora o tratamento possa ser aplicado antes, durante ou após a mistura do concreto, este trabalho foca na sua aplicação durante a cura. Nessa etapa, a difusão de CO_2, que ocorre 10^4 vezes mais rapidamente no ar do que na água [5], exige que a rede de poros permaneça parcialmente desobstruída. À medida que a carbonatação avança, os produtos formados ocupam progressivamente os poros, reduzindo a permeabilidade do meio [6].

Fatores como relação água/cimento, tipo e tempo de cura, adições minerais e temperatura influenciam fortemente a profundidade e velocidade de carbonatação. As adições minerais tendem a aumentar a profundidade de carbonatação, especialmente na ausência de cura adequada. Adições reativas, como metacaulim e sílica ativa, apresentam desempenho superior, e escória de alto-forno e cinzas volantes podem resultar em coeficientes de carbonatação mais elevados [7]. O efeito de diluição causado pela substituição parcial do cimento impacta ainda a velocidade de formação dos produtos de hidratação, responsáveis pelo ganho de resistência em idades iniciais [8,9].

A carbonatação acelerada também tem sido investigada em conjunto com técnicas de modelagem numérica, visando compreender os mecanismos de transporte e reação envolvidos, bem como aprimorar a previsão do desempenho e da durabilidade de materiais cimentícios. Em seu trabalho, Cheng et al. [10] identificaram que a carbonatação acelerada é governada pela difusão de água nos poros, resultando em um teor crítico de vazios praticamente constante. A influência de parâmetros microestruturais e de transporte na taxa e na profundidade da carbonatação foi estudado por Shah e Bishnoi [11], que demonstraram que o coeficiente de difusão aparente de CO_2 no concreto depende da tortuosidade do sistema, saturação e porosidade.

Abordagens probabilísticas também são um tópico pertinente no estudo da durabilidade. Duprat et al. [12] destacaram a relevância dessas abordagens que incorporam os efeitos das condições aceleradas, como altas pressões de CO_2, para a atualização de parâmetros e o dimensionamento baseado em confiabilidade. Muhit et al. [13] enfatizaram o potencial da integração entre modelos computacionais de

durabilidade, inteligência artificial e avaliação do ciclo de vida para aprimorar a previsão do desempenho e da sustentabilidade estrutural. O estudo da durabilidade de estruturas de concreto submetidas a algum método de carbonatação acelerada é importante para compreender como o material se comporta a longo prazo.

Compreendendo um campo de estudo ainda em desenvolvimento, a área de CCUS é vital para descarbonizar a indústria do cimento e promover a sustentabilidade na construção civil. O presente trabalho tem como objetivo investigar o efeito da mineralogia de escória e cinza volante em corpos de prova após o tratamento de carbonatação na cura, por meio de análise numérica por meio dos métodos dos elementos finitos.

METODOLOGIA

Depois de uma busca por publicações que englobassem carbonatação acelerada e modelagem numérica, ficou claro que esse era um tema ainda não explorado pela comunidade científica, até onde é do conhecimento dos autores deste trabalho. As modelagens realizadas nesse campo de estudo investigam majoritariamente cinética das reações e difusão de CO_2 [11,14–17]. Apesar de haver alguns trabalhos publicados que estudam a influência da carbonatação na resistência mecânica, os resultados se limitam a tensões máximas de compressão, e valores de módulo de Young ou Poisson não são mencionados [18–20]. Foi preciso então, utilizar dados experimentais da literatura para calcular os inputs necessários na implementação do modelo numérico.

Os dados utilizados nessa pesquisa foram obtidos na literatura, e após analisar os dados disponíveis para realizar a modelagem, foi ponderado que uma abordagem mais simplificada seria suficiente para entender o comportamento do material. Formulações mais robustas, como o CDP (*Concrete Damage Plasticity*) [21], trariam complexidade ao problema por meio da modelagem do comportamento pós pico do concreto, desnecessário para o que se pretende analisar. Portanto foi adotado como modelo constitutivo o linear elástico, com modelo 3D sólido composto por elementos hexaédricos com geometria quadrática do tipo C3D20 e integração completa. O controle por deslocamento foi escolhido por sua maior estabilidade em comparação ao controle por força, adotando o deslocamento total de 1mm.

PROPRIEDADES DOS MATERIAIS

Os valores de Módulo de elasticidade utilizados nesse trabalho tiveram como base o estudo feito por Dixit et al. [18]. A partir das tensões de compressão de amostras carbonatadas e não carbonatadas durante a cura, foi possível calcular o módulo de Young para cada caso por meio da aplicação da equação simplificada (Equação 1) desenvolvida pela ACI [22]. O coeficiente de Poisson foi assumido 0,2, valor usual para argamassas cimentícias, uma vez que seu cálculo envolve equações dependentes de dados de ensaio, e seu valor tende a se aproximar desse número quando se trata de materiais cimentícios.

$$E = 4700\sqrt{f_{ck}} \quad (1)$$

Tabela 1: Propriedades mecânicas dos corpos de prova testados [18]

Cura	MCS	Modelo numérico	*Uptake** em 1 dia (%)	Tensão de compressão aos 28 dias (MPa)	Módulo de Young (MPa)
Cura em condições ambientes	-	REF_NC	3,58	56	35172
	Escória	E_NC	3,00	49	32900
	Cinza volante	CV_NC	2,77	46	31877
Cura com carbonatação acelerada	-	REF_C1	8,63	51	33565
	Escória	E_C1	13,28	50	33234
	Cinza volante	CV_C1	5,93	48	32563

**Uptake*: absorção de carbono

Em Dixit et al. [18], as argamassas foram produzidas com 20% de substituição do cimento Portland, em massa, com fator água/cimento de 0,5 e traço de 1:2,5. Amostras de referências, sem substituição, também foram feitas. O processo de cura foi realizado numa câmara com 99,9% de CO_2, umidade relativa de 100%, pressão de 1,5 bar e 30°C por 24h. Esse período de tempo compreende de 24 a 48h após a moldagem, se tratando da cura do cilindro já desmoldado no seu estado endurecido. O *uptake* (absorção de CO_2) apresentado na Tabela 1 foi medido por termogravimetria, e a composição química dos materiais, obtida por Fluorescência de raios X, pode ser visto na Tabela 2.

Tabela 2: Composição química dos MCS e do cimento Portland usados em [18]

Óxidos	Cimento Portland	Escória	Cinza volante
SiO_2	19,02	29,82	53,63
Al_2O_3	4,69	13,41	32,49
CaO	66,48	47,31	4,77
Outros	9,81	9,46	9,11

ESTRATÉGIAS DE MODELAGEM

Os corpos de prova foram modelados com diâmetro de 50 mm e altura de 100 mm, e após testes de convergência, a malha otimizada foi gerada com 13736 elementos. A princípio, modelou-se um cilindro por extrusão, que foi particionado no seu eixo principal para facilitar a geração da malha. Para verificação do modelo, foi realizada uma análise estática linear, inserida por meio de um novo *step*, além do inicial, o qual continha apenas as condições de contorno iniciais do modelo. As condições de contorno e o passo na qual foram introduzidas estão descritas na Tabela 3.

Tabela 3: Condições de contorno e passos da análise

Condição de contorno	Step	
	Inicial	Análise
Base	U1=U2=U3=UR1=UR2=UR3=0	-
Topo	U1=U3=UR1=UR2=UR3=0	-
Compressão axial	-	U2 = -1

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Antes de discutir os resultados, é importante destacar as limitações dos modelos de elementos finitos. Por incorporarem apenas propriedades elásticas, a análise fica restrita ao regime linear do comportamento tensão x deformação do concreto, conforme o modelo constitutivo de Popovics [23]. O comportamento pós-pico, associado à perda de resistência à compressão axial, não é representável sem a inclusão de propriedades não lineares, como o CDP no *Abaqus*. No entanto, como o trabalho foca em pequenas deformações no regime elástico, consideramos que os modelos estão adequados.

A Tabela 4 apresenta os resultados das simulações numéricas para os seis modelos analisados, medidos na altura média de cada modelo. Entre os materiais não carbonatados, a amostra de referência (REF_NC) apresentou a maior tensão de compressão ($S_{min,principal}$ = -34,85 MPa), seguida pela escória (-32,60 MPa) e cinza volante (-31,59 MPa). Essa redução progressiva nas propriedades mecânicas está diretamente relacionada ao efeito de diluição e de hidratação tardia causado pela substituição parcial do cimento Portland pelos MCS, refletido nos menores módulos de Young apresentados na Tabela 1 (35172, 32900 e 31877 MPa, respectivamente).

Tabela 4: Tensões e deformações principais obtidas nos modelos numéricos

Modelo	S22 (MPa)	Tensão máxima de tração - Smax,principal (MPa)	Deformação axial - E22 (mm)	Deformação - Emáx,principal (mm)
REF_NC	-34,52	-0,6673	-1,008e-3	2,086e-4
REF_C1	-32,94	0,3866	-1,008e-3	2,086e-4
E_NC	-32,29	0,3789	-1,008e-3	2,086e-4
E_C1	-32,62	0,3827	-1,008e-3	2,086e-4
CV_NC	-31,29	0,3671	-1,008e-3	2,086e-4
CV_C1	-31,96	0,3750	-1,008e-3	2,086e-4

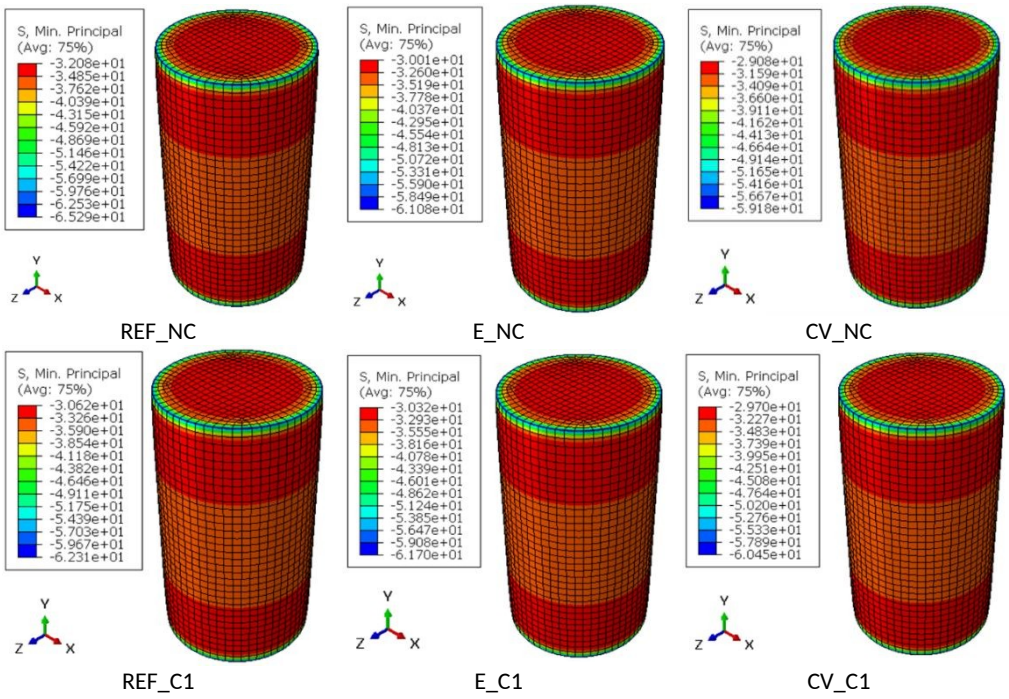
A composição química dos materiais (Tabela 2) evidencia o papel determinante do teor de CaO no comportamento mecânico. A redução de 66,48% de CaO no cimento Portland para 47,31% na escória e apenas 4,77% na cinza volante pode ser relacionada à diminuição da resistência à compressão aos 28 dias (56, 49 e 46 MPa) e, consequentemente, com as tensões máximas observadas nos modelos. Esse comportamento sugere que a substituição parcial do cimento, embora benéfica para a redução da pegada de carbono, pode resultar em perda de resistência mecânica inicial devido à menor disponibilidade de óxido de cálcio para formação dos produtos de hidratação, embora a cinética das reações não possa ser resumida a uma simplificação.

EFEITO DA CARBONATAÇÃO

A carbonatação produziu efeitos distintos nos três materiais analisados. A amostra de referência apresentou redução inesperada de 4,6% na tensão de compressão após carbonatação (Figura 1), possivelmente devido à formação de microfissuras ou redistribuição de produtos na matriz cimentícia. A escória exibiu ligeiro incremento de 1,0%, sugerindo que 24 horas de exposição foram insuficientes para ganho expressivo de resistência, dado que as reações pozolânicas são mais lentas que a hidratação do

cimento. Já a cinza volante obteve o maior incremento relativo (2,2%), indicando que os carbonatos formados contribuíram proporcionalmente mais para o refinamento microestrutural, mesmo com o menor *uptake* registrado.

Figura 1: Tensões à compressão dos modelos



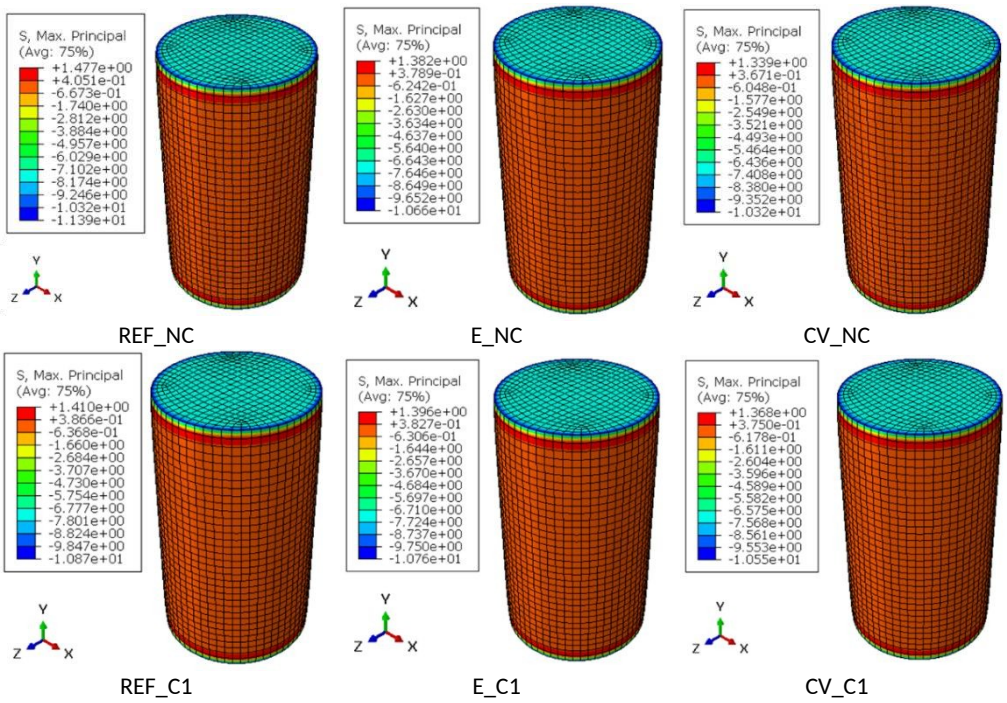
TENSÕES PRINCIPAIS

A análise das tensões principais revelou padrões distintos para compressão e tração nos modelos numéricos. As tensões máximas de compressão ($S_{min,principal}$) apresentaram valores coerentes com as resistências características reportadas por Dixit et al. [18], variando de -31,59 MPa (CV_NC) a -34,85 MPa (REF_NC). Esses valores representam aproximadamente 56-62% das tensões de compressão aos 28 dias apresentadas na Tabela 1, percentual compatível com o carregamento aplicado e as propriedades elásticas dos materiais.

As tensões de tração ($S_{max,principal}$) mantiveram-se em níveis significativamente inferiores (Figura 2), oscilando entre 0,3671 MPa e 0,3866 MPa, representando apenas cerca de 1% das tensões de compressão. Essa distribuição assimétrica é característica de ensaios de compressão uniaxial, onde pequenas componentes de tração surgem nas direções perpendiculares ao carregamento devido ao efeito Poisson. Os valores observados situam-se bem abaixo da resistência à tração dos materiais cimentícios (tipicamente 8-12% da resistência à compressão), indicando que não há risco de fissuração por tração durante o carregamento aplicado. A variável S22, representando a tensão na direção axial do carregamento, acompanhou proporcionalmente as diferenças de rigidez entre os materiais, apresentando valores entre -31,29 MPa e -34,52 MPa.

Figura 2: Tensões máximas de tração dos modelos

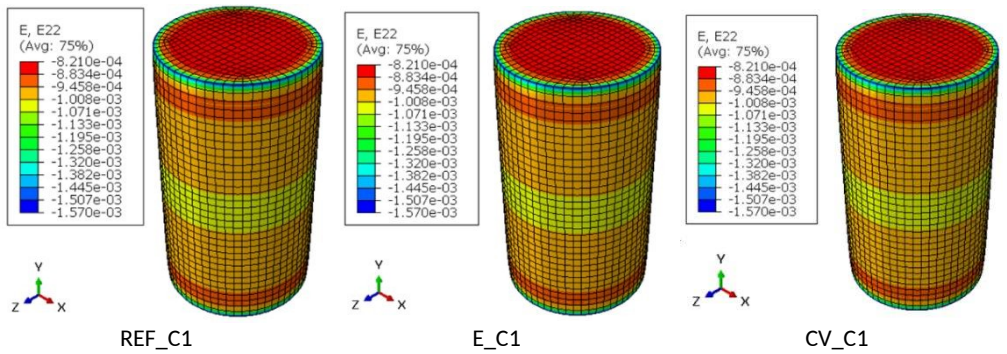
DOI: https://doi.org/10.46421/entac.v21i1.8375



DEFORMAÇÕES PRINCIPAIS

A deformação axial (Figura 3) manteve-se constante em -1,008×10^{-3} em todos os modelos, valor diretamente resultante do deslocamento imposto de 1 mm aplicado aos corpos de prova de 100 mm de altura ($\varepsilon = \Delta l / l_0 = 1/100$). Esse valor situa-se bem abaixo do limite convencional de deformação máxima do concreto sob compressão (2×10^{-3}), confirmando que todas as análises permaneceram dentro do regime elástico proposto e validando a correta implementação do controle por deslocamento no *Abaqus*.

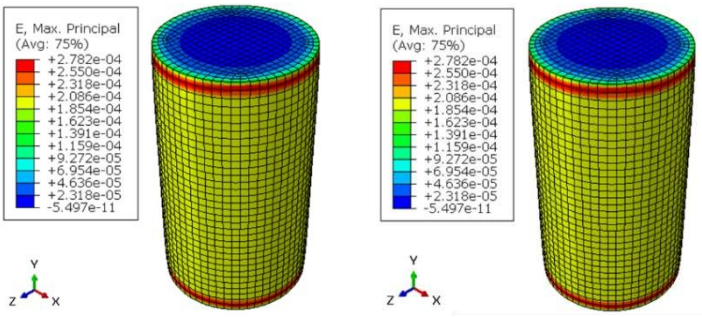
Figura 3: Deformações axiais dos modelos carbonatados



A deformação máxima principal ($E_{máx,principal}$ ou EPS) (Figura 4) também se manteve uniforme em 2,086×10^{-4} em todos os modelos, representando a deformação perpendicular ao carregamento pelo efeito Poisson. A constância desses valores entre materiais carbonatados, não carbonatados e diferentes mineralogias evidencia que as diferenças nas propriedades mecânicas se manifestam primariamente nas tensões desenvolvidas, e não nas deformações impostas, o que valida a abordagem comparativa adotada.

Figura 4: Deformações máximas principais dos modelos com escória

DOI: https://doi.org/10.46421/entac.v21i1.8375



E_NC E_C1

REGIÕES CRÍTICAS

A análise da distribuição das tensões principais de compressão revelou concentrações predominantemente nas extremidades superior e inferior dos corpos de prova, onde o carregamento é aplicado e as condições de contorno são impostas. Esse padrão é característico de efeitos de borda, decorrentes da descontinuidade geométrica e das restrições de apoio. As tensões nessas regiões atingiram valores até 8% superiores à média axial, representando pontos preferenciais para o início de processos de fissuração sob carregamentos elevados ou cíclicos.

A região central dos corpos de prova apresentou distribuição de tensões mais uniforme, com valores próximos aos calculados analiticamente, validando a adequação da malha de elementos finitos adotada. Essa uniformidade confirma que o comportamento interno do material não é significativamente influenciado pelas condições de contorno. Para modelos heterogêneos com camada carbonatada, as interfaces entre zonas carbonatadas e não carbonatadas também foram apontadas como regiões que merecem atenção em análises futuras.

RIGIDEZ EQUIVALENTE

A rigidez equivalente (K) dos corpos de prova, calculada através da relação K = EA/L, revelou diferenças significativas entre os materiais analisados (Tabela 5). A amostra de referência não carbonatada (REF_NC) apresentou a maior rigidez equivalente (690.601 N/mm), seguida pela escória (645.990 N/mm) e cinza volante (625.903 N/mm). Essa hierarquia reflete diretamente os módulos de elasticidade de cada material e confirma que a substituição parcial do cimento Portland por MCS resulta em redução da rigidez estrutural, com diminuições de 6,5% e 9,4% para escória e cinza volante, respectivamente.

Tabela 5: Rigidez equivalente dos modelos numéricos (com A=1963,495 mm² e L=100 mm)

Modelo	REF_NC	REF_C	E_NC	E_C	CV_NC	CV_C
E (MPa)	35172	33565	32900	33234	31877	32563
K (N/mm)	690601	659047	645990	652548	625903	639373

Após a carbonatação acelerada, observou-se comportamento divergente entre os materiais. A amostra de referência apresentou redução de 4,6% na rigidez equivalente (659.047 N/mm), comportamento atribuído a possíveis microfissuras ou redistribuição de produtos na matriz. A escória manteve rigidez praticamente inalterada (652.548 N/mm, incremento de 1,0%), enquanto a cinza volante exibiu o maior ganho relativo

(639.373 N/mm, incremento de 2,2%). Esses resultados demonstram que a carbonatação acelerada afeta distintamente cada material, dependendo de sua composição mineralógica e reatividade. A rigidez equivalente constitui parâmetro fundamental para avaliação do comportamento estrutural, influenciando diretamente a distribuição de cargas e deformações em elementos de concreto.

INFLUÊNCIA DA MINERALOGIA NO COMPORTAMENTO MECÂNICO

O teor de óxido de cálcio (CaO) mostrou-se o parâmetro mineralógico mais determinante no comportamento mecânico dos materiais. Sua progressão decrescente (cimento Portland > escória > cinza volante) refletiu-se diretamente nas tensões máximas de compressão dos materiais não carbonatados. A escória, apesar do maior *uptake* de CO_2 (13,28%), não apresentou ganhos significativos de resistência após carbonatação, comportamento atribuído à lentidão das reações pozolânicas e ao tempo de exposição de 24 horas, insuficiente para converter os carbonatos em produtos mecanicamente relevantes.

A cinza volante, com o menor *uptake* (5,93%) e baixíssimo teor de CaO (4,77%), apresentou o maior incremento relativo de tensão. Isso sugere que os carbonatos formados se concentraram em regiões estratégicas da microestrutura, promovendo refinamento localizado dos poros, possivelmente favorecido pelo elevado teor de SiO_2 (53,63%) e Al_2O_3 (32,49%), que propiciaram a formação de produtos de carbonatação mais eficientes.

CONCLUSÕES

O presente trabalho investigou o efeito da mineralogia de materiais cimentícios suplementares no comportamento elástico de corpos de prova submetidos à carbonatação acelerada através de modelagem numérica em elementos finitos. Os resultados demonstraram que a substituição parcial do cimento Portland por escória e cinza volante resulta em redução da rigidez equivalente de 6,5% e 9,4%, respectivamente, correlacionada diretamente com o teor de óxido de cálcio dos materiais.

A carbonatação acelerada apresentou efeitos distintos dependendo da mineralogia: a amostra de referência exibiu redução de 4,6% na rigidez, enquanto a escória manteve-se praticamente inalterada (incremento de 1,0%) e a cinza volante demonstrou o maior ganho relativo (2,2%). Esses resultados evidenciam que o tempo de exposição de 24 horas pode ser insuficiente para promover ganhos significativos de resistência, especialmente em materiais com reações pozolânicas mais lentas como a escória, apesar do elevado *uptake* de CO_2 (13,28%).

A modelagem numérica aliada aos dados experimentais mostrou-se ferramenta valiosa para previsão do comportamento de materiais cimentícios carbonatados. Como trabalhos futuros, propõe-se o estudo comparativo de modelos heterogêneos com diferentes espessuras de camada carbonatada ao longo do tempo, investigando como a heterogeneidade afeta a distribuição de tensões e a durabilidade das estruturas tratadas com carbonatação acelerada. Além disso, também é proposto a

elaboração de um modelo que capture o comportamento pós pico do concreto, com a fase não linear, usando o CDP calibrado com ensaios de corpos de prova reais.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPq (processo 130489/2023-9) e à FAPERJ (processo E-26/202.483/2024) pelo apoio financeiro recebido durante o desenvolvimento do trabalho.

DECLARAÇÃO

Durante a preparação deste artigo, o primeiro autor utilizou a ferramenta Claude para a tradução do resumo e revisão do texto. Após a utilização da ferramenta, os autores revisaram e editaram o conteúdo conforme necessário e assumem total responsabilidade pelo conteúdo do artigo publicado.

REFERÊNCIAS

[1] United Nations, The Human Fingerprint on Greenhouse Gases, (2023). https://www.un.org/en/global-issues/climate-change (accessed February 10, 2025).

[2] World Meteorological Organization, WMO confirms 2024 as warmest year on record at about 1.55°C above pre-industrial level, WMO (2025). https://wmo.int/news/media-centre/wmo-confirms-2024-warmest-year-record-about-155degc-above-pre-industrial-level (accessed March 21, 2025).

[3] IPCC, Understanding carbon dioxide removal, Https://Climatescience2030.Com/What-Is-Cdr/ (2023).

[4] IPCC, AR6 - Emissions Trends and Drivers, Cambridge University Press, 2023. https://doi.org/10.1017/9781009157926.004.

[5] L. Bertolini, B. Elsener, P. Pedeferri, E. Redaelli, R. Polder, Corrosion of Steel in Concrete, 2ª, Wiley-VCH ; John Wiley [distributor], Weinheim, Germany, 2013.

[6] A. Neville, Properties of Concrete, Prentice Hall, 2012.

[7] O. Cascudo, H. Carasek, Carbonatação do concreto, in: Concreto: Ciência e Tecnologia, 3ª Edição, IBRACON, São Paulo, 2022: pp. 965–1012.

[8] G.C. Cordeiro, Utilização de cinzas ultrafinas do bagaço de cana-de-açúcar e da casca de arroz como aditivos minerais em concreto, Laboratório de Estruturas do Programa de Engenharia Civil da COPPE - Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2006.

[9] S. Ramanathan, M. Croly, P. Suraneni, Comparison of the effects that supplementary cementitious materials replacement levels have on cementitious paste properties, Cem. Concr. Compos. 112 (2020). https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2020.103678.

[10] L. Cheng, R. Kurihara, Z. Yang, T. Ohkubo, R. Kitagaki, A. Teramoto, Y. Suda, I. Maruyama, Accelerated carbonation fronts in cement pastes: Mechanistic insights and simplified modeling, Cem. Concr. Res. 199 (2026). https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2025.108050.

[11] V. Shah, S. Bishnoi, Understanding the process of carbonation in concrete using numerical modeling, Journal of Advanced Concrete Technology 19 (2021) 1148–1161. https://doi.org/10.3151/jact.19.1148.

[12] F. Duprat, N.T. Vu, A. Sellier, Accelerated carbonation tests for the probabilistic prediction of the durability of concrete structures, Constr. Build. Mater. 66 (2014) 597–605. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.05.103.

[13] I.B. Muhit, A. Al-Fakih, T. Suntharalingam, A. Michel, Progress in Computational Modelling for Concrete Durability and Its Integration with Artificial Intelligence and Life-Cycle Assessment, Archives of Computational Methods in Engineering (2025). https://doi.org/10.1007/s11831-025-10373-x.

[14] S. Kashef-Haghighi, Y. Shao, S. Ghoshal, Mathematical modeling of CO2 uptake by concrete during accelerated carbonation curing, Cem. Concr. Res. 67 (2015) 1–10. https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2014.07.020.

[15] S.Y. Pan, T.C. Ling, A.H.A. Park, P.C. Chiang, An overview: Reaction mechanisms and modelling of CO2 utilization via mineralization, Aerosol Air Qual. Res. 18 (2018) 829–848. https://doi.org/10.4209/aaqr.2018.03.0093.

[16] X. Zha, M. Yu, J. Ye, G. Feng, Numerical modeling of supercritical carbonation process in cement-based materials, Cem. Concr. Res. 72 (2015) 10–20. https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2015.02.017.

[17] L. Cheng, R. Kurihara, Z. Yang, T. Ohkubo, R. Kitagaki, A. Teramoto, Y. Suda, I. Maruyama, Accelerated carbonation fronts in cement pastes: Mechanistic insights and simplified modeling, Cem. Concr. Res. 199 (2026). https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2025.108050.

[18] A. Dixit, G. Geng, H. Du, S.D. Pang, The role of age on carbon sequestration and strength development in blended cement mixes, Cem. Concr. Compos. 133 (2022). https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2022.104644.

[19] H. Guleria, D. Sharma, S. Goyal, Long term performance of concrete using accelerated carbonation curing: an effective CCUS technique, European Journal of Environmental and Civil Engineering 28 (2024) 2138–2159. https://doi.org/10.1080/19648189.2023.2295502.

[20] M.Á. Sanjuán, E. Estévez, C. Argiz, D. del Barrio, Effect of curing time on granulated blast-furnace slag cement mortars carbonation, Cem. Concr. Compos. 90 (2018) 257–265. https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2018.04.006.

[21] M. Hafezolghorani, F. Hejazi, R. Vaghei, M.S. Bin Jaafar, K. Karimzade, Simplified damage plasticity model for concrete, in: Structural Engineering International, Int. Assoc. for Bridge and Structural Eng. Eth-Honggerberg, 2017: pp. 68–78. https://doi.org/10.2749/101686616X1081.

[22] American Concrete Institute, Building code requirements for structural concrete (ACI 318-11) and commentary, American Concrete Institute, 2011.

[23] S. Popovics, A numerical approach to the complete stress-strain curve of concrete, Pergamon Press, Inc, 1973.