CAPÍTULO 43 · Parte II · Materiais
DOI do capítulo: https://doi.org/10.67775/f2ryzx24
Trabalho apresentado no CBPAT 2026 e publicado nos anais do evento: https://doi.org/10.67775/eh8dvn09

INFLUÊNCIA DA RELAÇÃO A/C NA CARBONATAÇÃO DO CIMENTO SUPERSULFATADO AVALIADA POR MICRODUREZA

Jeovana Thalheimer[1]*, Rafael Antonio Colla[1]; Julia Kich de Ré[2]; Vitor Baldin[3]; Maria Nalu Verona Gomes[3] e Caroline Angulski da Luz[4]

*Autor de contato: jeovanathalheimer@alunos.utfpr.edu.br[1]

[1] Graduandos de Engenharia Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco, Brasil
[2] Mestre em Engenharia Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco, Brasil
[3] Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco, Brasil
[4] Departamento de Construção Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco, Brasil

RESUMO

O cimento supersulfatado (CSS) apresenta-se como um ligante de menor impacto ambiental em comparação ao cimento Portland devido ao seu reduzido teor de clínquer. Constituído predominantemente por escória de alto-forno (70-90%), sulfato de cálcio (10-20%) e ativador alcalino (até 5%), apresenta matriz cimentícia formada essencialmente por C-S-H e etringita. No entanto, a ausência de portlandita, torna-o mais suscetível à carbonatação natural, processo que reduz o pH do concreto e pode levar à despassivação da armadura. Diante disso, esse trabalho avaliou a influência da relação a/c (água/cimento) no desempenho de pastas feitas com CSS e submetidos à carbonatação natural. Foram adotadas relações a/c de 0,4 e 0,5 e idades de análise aos 0, 4, 12 e 28 semanas, por meio de ensaios de microdureza Vickers. Os resultados evidenciaram que a carbonatação exerce influência negativa sobre a microdureza, enquanto a diminuição da relação a/c contribui para mitigar o avanço da carbonatação no CSS, apresentando comportamento semelhante ao observado no cimento Portland.
Palavras-chave: carbonatação; relação a/c; cimento supersulfatado; microdureza Vickers.

ABSTRACT

Supersulfated cement (SSC) presents itself as a binder with less environmental impact compared to Portland cement due to its reduced clinker content. Composed predominantly of blast furnace slag (70-90%), calcium sulfate (10-20%), and alkaline activator (up to 5%), it has a cementitious matrix formed mainly by C-S-H and ettringite. However, the absence of portlandite makes it more susceptible to natural carbonation, a process that reduces the pH of the concrete and can lead to the depassivation of the reinforcement. Therefore, this work evaluated the influence of the w/c (water/cement) ratio on the performance of mixes made with SSC and subjected to natural carbonation. W/c ratios of 0.4 and 0.5 were adopted, and analysis ages were 0, 4, 12, and 28 weeks, using Vickers microhardness tests. The results showed that carbonation has a negative influence on microhardness, while decreasing the water/cement ratio helps to mitigate the progression of carbonation in CSS, exhibiting behavior similar to that observed in Portland cement.
Keywords: carbonation; w/c ratio; supersulfated cement.

1. INTRODUÇÃO

A indústria do cimento é uma das maiores responsáveis pela emissão de gases do efeito estufa (GEE), respondendo por cerca de 7% das emissões de GEE emitidos pelo homem (SNIC, 2024). A alta emissão desses gases têm corroborado com o aquecimento global e mudanças climáticas, como inundações, secas, queimadas e furacões, ameaçando a saúde humana e ambiental (PNUMA, 2022). Diante do exposto, vêm sendo estudado a aplicação de cimentos que possuam baixo impacto ambiental.

O cimento supersulfatado (CSS) se apresenta como uma alternativa sustentável ao cimento Portland (CP), emitindo cerca de 90% de CO_2 a menos. Esse cimento é composto por 70-90% de escória de alto-forno, 10-20% de uma fonte de sulfato de cálcio e uma quantidade inferior a 5% de ativador alcalino (Gijbels *et al*., 2020). Como propriedades, o CSS oferece boa resistência ao ataque por sulfatos, baixo calor de hidratação e possui expectativas de aplicação em obras marítimas, rodoviárias e hidráulicas (Gong *et al*., 2026).

Os principais produtos de hidratação do CSS são a etringita (AFt) e C-S-H, semelhantes aos produtos formados pelo CP (Liao *et al*., 2023). O CSS possui uma reserva alcalina menor que o CP, pois a portlandita ($Ca(OH)_2$) se apresenta em menores quantidades, tornando esse cimento suscetível à carbonatação (Kich de Ré, 2025). Enquanto no CP o CO_2, na presença de umidade, reage com a etringita (AFt), silicato de cálcio hidratado (C-S-H) e portlandita ($Ca(OH)_2$), no CSS há pouca presença de portlandita, fazendo com que as suas principais fases hidratadas se tornem alvos da carbonatação (Cadore; Angulski da Luz; Farias de Medeiros, 2019)

Na literatura, há estudos recentes que buscaram melhorar a resistência à carbonatação do CSS. Kich de Ré (2025) analisou a influência do ativador alcalino (KOH e CPV) na carbonatação em concretos com CSS feitos com escória básica e importada e teve como resultado, melhores índices de carbonatação com o ativador alcalino CPV. Chen *et al.* (2025) também estudaram uma forma de melhorar a resistência à carbonatação do CSS, utilizando materiais siliciosos reativos (nano-sílica e sílica /fume) e obtiveram aumento na resistência à carbonatação com os dois materiais.

Por outro lado, a literatura carece de estudos sobre como a microdureza se comporta em pastas ou concretos expostos à carbonatação. Nesse contexto, Jia *et al.* (2020) observaram que pastas de cimento Portland expostas ao CO_2 tiveram aumento na microdureza superficial devido à formação de $CaCO_3$. No entanto, a resistência à compressão teve uma piora justificada pela influência negativa da carbonatação na hidratação do CP, concluindo que os produtos de hidratação no CP possuem um peso maior na resistência total do que o efeito da carbonatação superficial.

Xuan, Zhan e Poon (2016) também utilizaram o ensaio de microdureza como ferramenta de análise em cimento Portland, observando aumento da microdureza, resistência à compressão e flexão em concretos feitos com agregado reciclado carbonatado. Assim, embora ainda pouco explorada, a microdureza tem sido aplicada em pastas e concretos feitos com CP. Em contrapartida para o cimento supersulfatado (CSS), os estudos são ainda mais escassos, sendo identificada na literatura apenas os trabalhos de Thalheimer *et al*. (2025) e Colla *et al*. (2025), no qual foi analisado a influência das relações a/c e condições de cura na carbonatação natural de concretos e pastas feitos com CSS até no máximo 12 semanas de exposição ao CO_2. Dessa forma, este estudo possui como objetivo utilizar a análise da microdureza em pastas de cimento supersulfatado (CSS) expostas à

carbonatação natural por 0, 4, 12 e 28 semanas, colaborando com os outros estudos já existentes para a melhoria da resistência à carbonatação do CSS.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Materiais

O cimento supersulfatado (CSS) foi produzido com escória granulada de alto-forno previamente triturada e peneirada em peneira com abertura de 150 μm, anidrita ($CaSO_4$) como fonte de sulfato de cálcio e cimento Portland de alta resistência inicial, CP V – ARI da marca Supremo como ativador alcalino. Para a formação da anidrita, o gesso (sulfato hemidratado) foi calcinado em um forno do tipo mufla a 650 °C, durante 1 hora com taxa de aquecimento de 30 °C/min. A adoção dessa forma anidra justifica-se por seu comportamento intermediário quanto ao tempo de pega, em comparação às formas hidratada ($CaSO_4.2H_2O$) e hemi-hidratada ($CaSO_4.0{,}5H_2O$) (Kich de Ré, 2025).

A composição química da escória e fonte de sulfato de cálcio, analisadas por fluorescência de raios X (FRX), está apresentada na tabela 1. O FRX foi realizado no Laboratório de Análise de Minerais e Rochas (LAMIR), da UFPR - Campus Curitiba utilizando espectrômetro PANalytical, modelo Axios Max, com software SuperQ 5.3. As amostras passaram por secagem, quarteamento e moagem, para posterior confecção de pastilhas prensadas com adição de cera orgânica, seguidas de varredura química. A determinação da perda ao fogo (P.F.) foi realizada a 1000 ºC, durante duas horas. Após a análise da composição química da escória, seguindo a classificação delineada na norma EN 15743:2010, verificou-se que a soma de $CaO+MgO+SiO_2$ ultrapassa 66,7, com a razão de $CaO+MgO/SiO_2$ superior a 1. Consequentemente, esta escória é categorizada como básica.

A determinação da massa específica e da superfície específica da escória e do sulfato de cálcio foi realizada de acordo com os procedimentos descritos nas normas NBR 16605 (ABNT, 2017) e NBR 16372 (ABNT, 2015), respectivamente.

Tabela 1 – Composição físico-química dos materiais utilizados

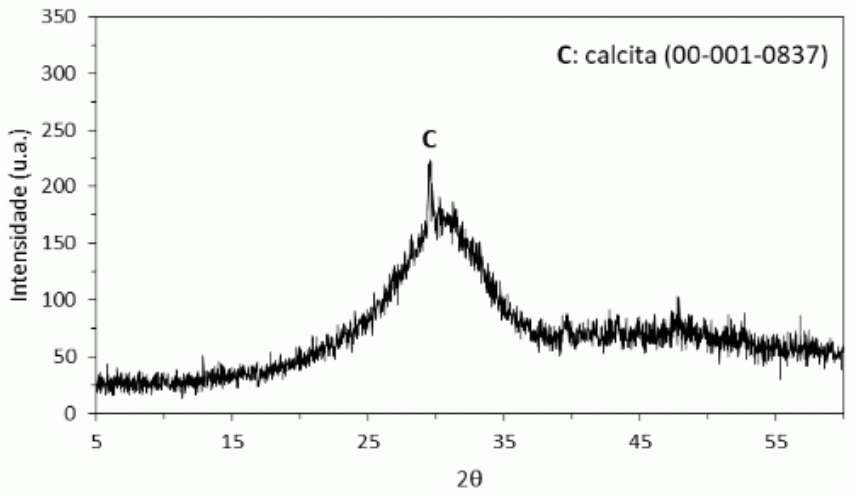
Composição química	Teores (%)			EN 15473:2010
	Sulfato de cálcio	Ativador alcalino	Escória	
CaO	38,50	38,50	46,80	-
SiO_2	0,30	18,3	35,0	-
AL_2O_3	0,10	4,30	7,60	-
MgO	-	5,80	5,60	-
MnO	-	-	1,80	-
SO_3	54,10	2,40	1,0	-
TiO_2	-	-	0,60	-
F_2O_3	-	3,00	0,60	-

K_2O	-	0,89	0,50	-
SrO	0,20	-	0,20	-
Na_2O	-	0,16	0,10	-
CO_2	-	4,10	-	-
BaO	-		0,10	-
ZrO_2	-		-	-
Y_2O_3	-		<0,1	-
P_2O_5	-		<0,1	-
Resíduo insolúvel	-	2,50	-	-
Perda ao fogo	6,75	5,40	-0,47	-
$CaO + MgO + SiO_2$	-	-	87,4	≥ 66,7
$(CaO + MgO) / SiO_2$	-	-	1,60	≥ 1,0
Massa específica (g/cm^3)	2,66	3,12	2,80	-
Superfície de Blaine (cm^2/g)	5655,0	4911,0	3657,0	-

Fonte: os autores.

A identificação das fases cristalinas da escória foi realizada por meio de difração de raios X (DRX), utilizando difratômetro MiniFlex 600, com radiação CuKα e tensão de 40 kV. A varredura foi conduzida no intervalo de 5° a 60° (2θ), com passo de 0,02° e velocidade de 3°/min. O difratograma obtido indicou predominância de material amorfo, evidenciada pela ausência de picos cristalinos.

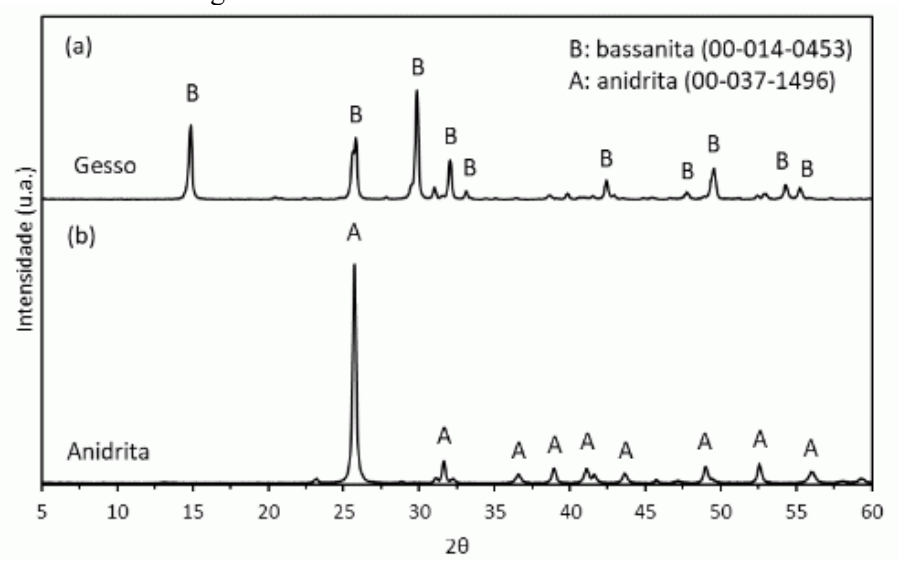
Figura 1 – DRX da escória de alto-forno



Fonte: os autores.

A figura 2 ilustra a comprovação da transformação do material hemi-hidratado para a sua forma anidra através do teste de DRX.

Figura 2 – DRX da fonte de sulfato de cálcio



Fonte: os autores.

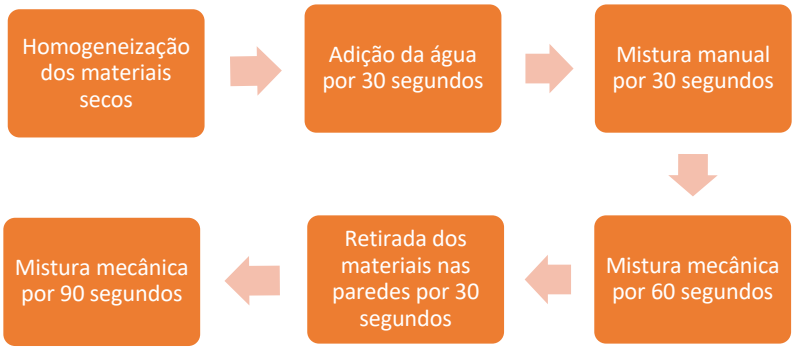
2.2 Métodos

Para a produção do cimento supersulfatado (CSS), foi utilizado escória de alto-forno, sulfato de cálcio e ativador alcalino seguindo a composição adotada por Kich de Ré (2025), equivalente à 84% de escória de alto-forno, 15% de anidrita e 1% de ativador alcalino. Para a moldagem das pastas e dos concretos, foi adotado relação a/c de 0,4 e 0,5.

2.2.1 Moldagem das pastas

As pastas foram moldadas com o propósito de analisar a microdureza após 0, 4, 12 e 28 semanas de exposição à carbonatação. O procedimento para a mistura das pastas foi o mesmo realizado por Kich de Ré (2025), descrito na figura 3.

Figura 3 – Procedimento de mistura das pastas



Fonte: os autores.

Após o preparo, as pastas foram colocadas em moldes de 3x3x3cm. Os corpos de prova foram vedados com filme plástico e mantidos em câmara úmida sob temperatura controlada de 23°C. A desmoldagem ocorreu após cinco dias. Na sequência, as amostras foram transferidas para cura em

solução saturada de hidróxido de cálcio, na concentração de 3 g/L, onde permaneceram imersas até completarem 28 dias de idade.

2.2.2 Exposição à carbonatação natural

Após o período de cura de 28 dias, os corpos de prova foram submetidos à carbonatação natural por 4, 12 e 28 semanas, em ambiente laboratorial. A exposição ocorreu em sala climatizada, com temperatura ajustada para 23 °C, podendo ocorrer pequenas variações em função da circulação de pessoas no local.

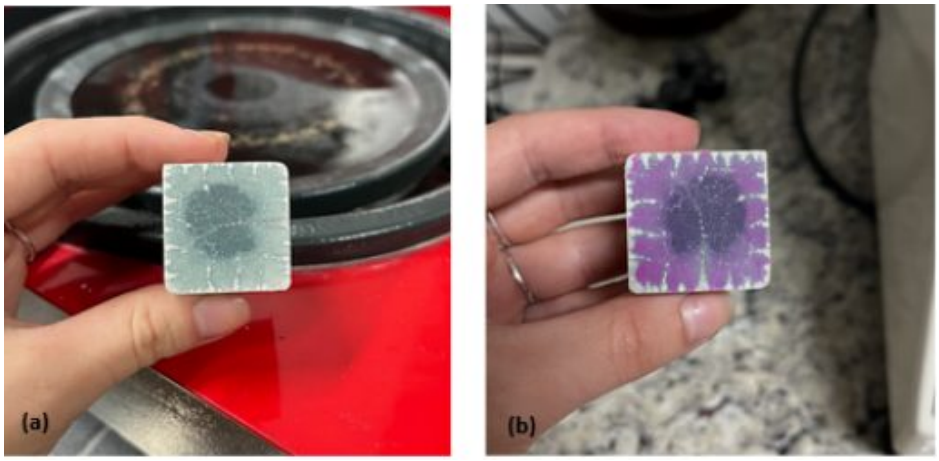
Para as amostras de pasta, foi necessário realizar a proteção parcial das superfícies, a fim de assegurar a existência de regiões não carbonatadas, especialmente nas amostras com 12 e 28 semanas de exposição, permitindo a comparação das medições de microdureza Vickers. Assim, duas faces opostas foram vedadas com placas de vidro, fixadas com silicone, de modo a impedir a penetração de CO_2 nessas áreas e controlar a progressão da carbonatação.

2.2.3 Microdureza Vickers

A microdureza Vickers foi empregada na avaliação das pastas de cimento aos 0, 4, 12 e 28 semanas de exposição à carbonatação. O ensaio baseia-se na aplicação de carga por meio de penetrador piramidal de diamante sobre a superfície da amostra, sendo a dureza (HV) determinada pela razão entre a força aplicada e a área da impressão gerada. As medições foram realizadas em microdurômetro Shimadzu, modelo TH710, no Laboratório de Mecânica da UTFPR, campus Pato Branco.

Para assegurar a confiabilidade dos resultados, as amostras passaram por preparação superficial prévia, incluindo lixamento com lixa de granulometria 1200 e uso de solução de alumina como abrasivo, até ser possível distinguir as regiões carbonatadas (área esbranquiçada) e não carbonatadas (área azulada) (figura 4-a). Para confirmação das áreas, realizou-se a aspersão de solução de fenolftaleína, sendo a região com coloração roxa indicativa da área não carbonatada (figura 4-b). Em seguida, realizou-se o polimento em politriz, utilizando álcool como lubrificante.

Figura 4 – Corpo de prova para o ensaio de microdureza (a) após o lixamento, (b) após a aspersão de fenolftaleína



Fonte: os autores.

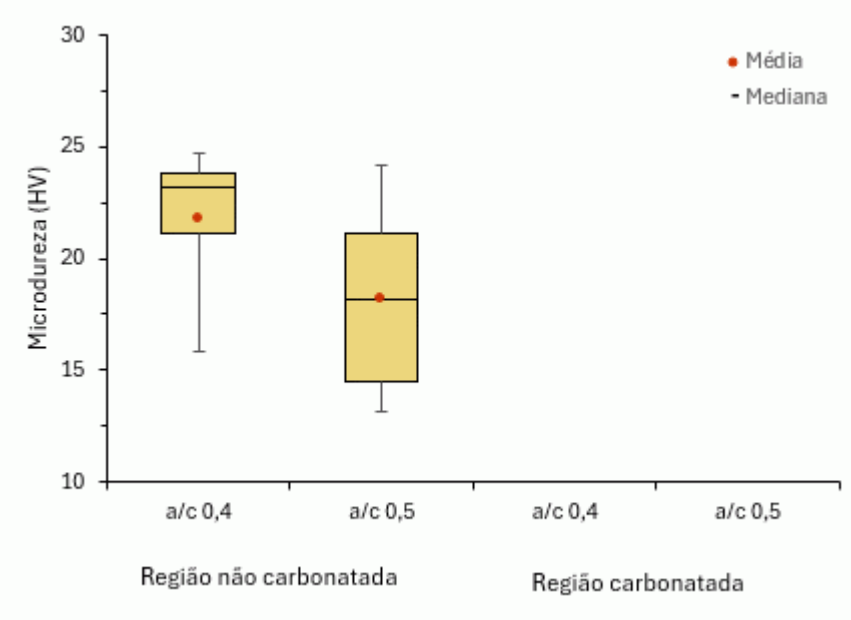
Após a etapa de preparação superficial, as amostras foram submetidas ao ensaio de microdureza com aplicação de carga de 2,94 N. As medições foram realizadas tanto na região carbonatada

quanto na região não carbonatada. O procedimento teve como finalidade analisar as alterações no comportamento mecânico das pastas em decorrência do avanço da carbonatação.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados de microdureza Vickers estão apresentados na figura 5, 6, 7 e 8.

Figura 5 – Microdureza Vickers nas pastas de relação a/c 0,5 e 0,4 com 0 semanas de carbonatação



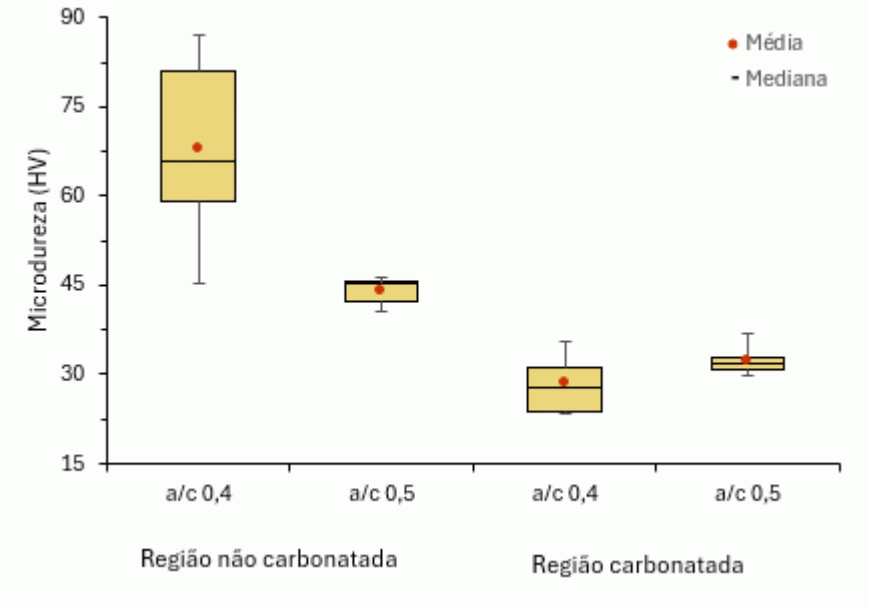
Fonte: os autores.

A figura 5 apresenta os resultados de microdureza Vickers das pastas de CSS obtidos com 0 semanas de exposição a carbonatação, portanto, não há resultados de microdureza na região carbonatada. Nota-se que a pasta feita com a relação a/c 0,4 apresentou maiores resultados em comparação com a pasta realizada com relação a/c 0,5. Esse resultado, se assemelhou ao encontrado por Vieira (2010), onde foi concluído que quanto maior a relação água/cimento (a/c), menor a microdureza média, devido a maior porosidade na matriz cimentícia.

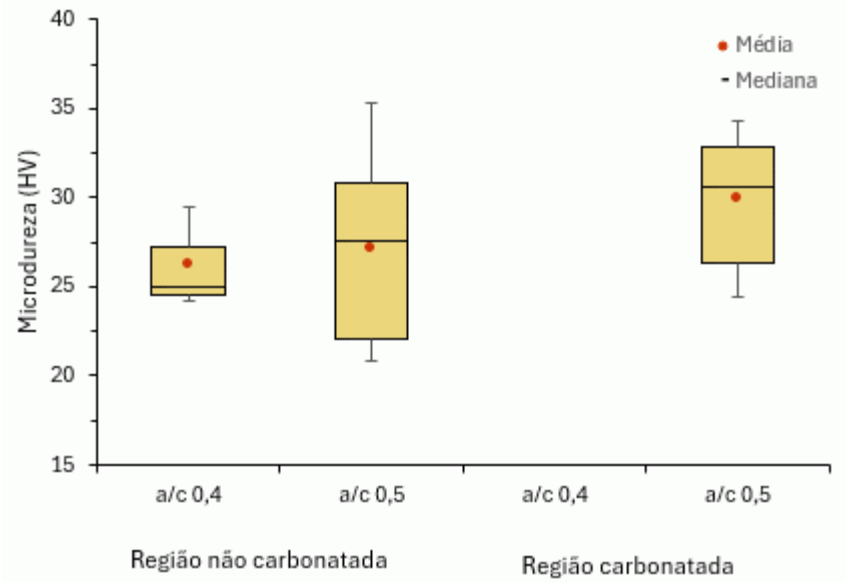
Figura 6 – Microdureza Vickers nas pastas de relação a/c 0,5 e 0,4 com 4 semanas de carbonatação
Fonte: os autores.

Após 4 semanas de exposição à carbonatação (figura 6), a microdureza Vickers aumentou em comparação com as pastas com 0 semanas de exposição. Na região carbonatada, a pasta com relação a/c 0,5 atingiu média superior à região não carbonatada, resultado semelhante ao que Vecchia (2009) observou, onde as pastas de cimento Portland submetidas a CO_2 supercrítico, ocorre inicialmente um aumento da microdureza, seguido por uma redução decorrente da bicarbonatação, que gera produtos porosos e amorfos. Por sua vez, na região não carbonatada a pasta com relação a/c 0,5 apresentou valores maiores que a pasta com relação a/c 0,4, embora houve maior dispersão de dados. É importante ressaltar que, com 4 semanas de exposição ao CO_2, a pasta com menor relação a/c não havia carbonatado, evidenciando a sua maior resistência a penetração de CO_2.

Figura 7 – Microdureza Vickers nas pastas de relação a/c 0,5 e 0,4 com 12 semanas de carbonatação

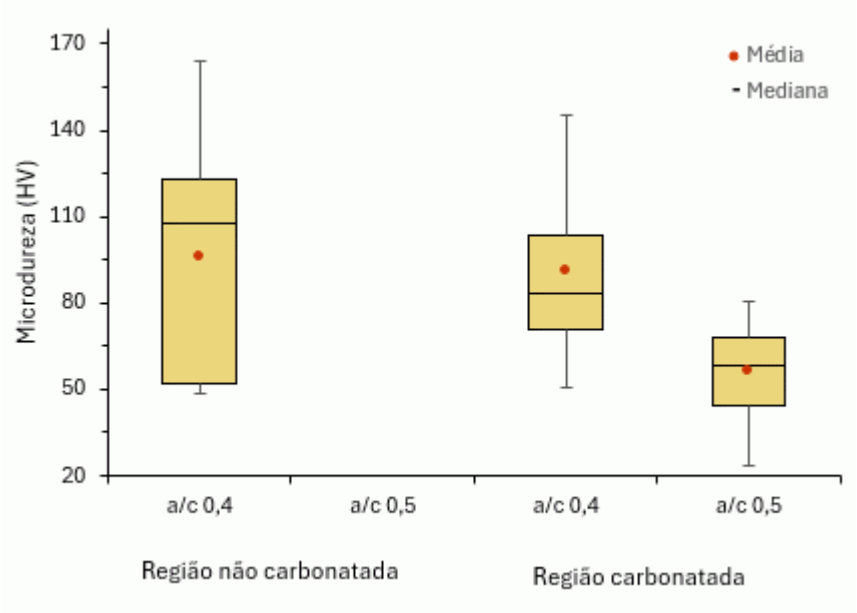


Fonte: os autores.



Com 12 semanas de carbonatação (figura 7), na região carbonatada a pasta com relação a/c 0,5 não teve aumento de microdureza em comparação com 4 semanas. Por outro lado, a pasta com relação a/c 0,4 já havia apresentado sinais de carbonatação, com valores de microdureza inferiores na região carbonatada. Na região não carbonatada, observou-se uma inversão em relação ao comportamento de 4 semanas, haja vista que, a menor relação a/c apresentou os maiores valores de microdureza apesar de, ainda apresentar uma grande variabilidade nos resultados devido ao material ser considerado heterogêneo.

Figura 8 – Microdureza Vickers nas pastas de relação a/c 0,5 e 0,4 com 28 semanas de carbonatação



Fonte: os autores.

Com 28 semanas de exposição (figura 8), observa-se que a microdureza atingiu valores superiores às idades anteriores. Na região não carbonatada, a pasta com relação a/c 0,4 apresentou microdureza com média a 100 HV, enquanto a pasta com relação a/c 0,5 havia carbonatado por inteiro. Na região carbonatada, a pasta com relação a/c 0,4 apresentou valores de microdureza superiores à pasta com relação a/c 0,5.

Os resultados, evidenciam aumento geral da microdureza das pastas ao longo do tempo mesmo expostas à carbonatação natural, tanto em regiões carbonatadas quanto não carbonatadas. Além disso, houve uma maior variabilidade de resultados com a pasta com relação a/c 0,4, comportamento semelhante ao relatado por Shen *et al.* (2017) em pastas de cimento Portland, onde a dureza variou conforme o ponto de indentação. De modo geral, as regiões não carbonatadas e

com menor relação a/c apresentaram maiores valores. Tais resultados indicam que a carbonatação reduz a microdureza, e que a relação a/c exerce uma influência determinante carbonatação e microdureza do material.

4. CONCLUSÃO

Este trabalho avaliou a influência da relação a/c (0,4 e 0,5) nas pastas de cimento supersulfatado expostas a carbonatação natural através da análise de microdureza. Podem ser tiradas as seguintes conclusões:

(a) Sem a presença de carbonatação nas pastas de cimento supersulfatado, a microdureza apresenta valores maiores na relação a/c 0,4 em comparação com a relação a/c 0,5. Esse resultado evidencia a formação de uma matriz mais densa, oferecendo melhores resultados de microdureza em pastas de CSS com menores relações a/c.
(b) A menor relação a/c (0,4) apresentou maior resistência à penetração de CO_2. Esse resultado se confirma na figura 6, onde após 4 semanas de exposição ao CO_2, a pasta de CSS de menor relação a/c ainda não havia evidenciado sinais de carbonatação.
(c) O processo de bicarbonatação, onde a carbonatação aumenta a microdureza de pastas feitas com cimento Portland devido ao preenchimento dos vazios, também ocorre na pasta de CSS exposta. Em 4 semanas de exposição ao CO_2, a pasta com relação a/c 0,5 apresentou sinais de carbonatação e microdurezas maiores na região carbonatada em comparação com a região não carbonatada.
(d) A formação dos produtos hidratados de CSS ocorreu de forma mais rápida na pasta com relação a/c maior, tendo em vista que a região não carbonatada com relação a/c 0,5 apresentou microdureza superior à região não carbonatada com relação a/c 0,4 após 4 semanas de moldagem. Em 12 semanas de moldagem, esse resultado se inverteu, a menor relação a/c apresentou maiores valores de microdureza na região onde não ocorreu carbonatação.
(e) A microdureza teve um impacto negativo nas pastas de CSS com a carbonatação. Em todas as medições de microdureza, a região carbonatada apresentou valores inferiores à região não carbonatada do mesmo corpo de prova. Sendo que, na última idade a menor relação a/c apresentou maior valor de microdureza. Portanto, menores relações a/c nas pastas de cimento supersulfatado em idades de carbonatação avançada, possuem menor suscetibilidade à penetração de CO_2.

Esse estudo visou contribuir com o comportamento do cimento supersulfatado exposto à carbonatação natural através da análise da microdureza. Pesquisas futuras poderiam investigar a variabilidade dos resultados de microdureza em pastas de CSS expostas à carbonatação natural através da identificação das fases cristalinas, bem como avaliar estratégias de melhoria da microdureza em concretos à base de cimento supersulfatado, incluindo a análise da zona de transição interfacial (ZTI).

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPq (406517/2023-1) pelo apoio financeiro, ao Programa PIVIC/UTFPR pelo incentivo à pesquisa e à central de análises da UTFPR – Câmpus Pato Branco.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16372**: Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da finura pelo método de permeabilidade ao ar (método de Blaine). Rio de Janeiro, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16605**: Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 2017.

CADORE, D. E.; ANGULSKI DA LUZ, C.; FARIAS DE MEDEIROS, M. H. An investigation of the carbonation of alkaline activated cement made from blast furnace slag generated by charcoal. **Construction and Building Materials**, v. 226, p. 117–125, 2019.

CHEN, H.; SONG, Z.; LIU, B.; SUN, G.; HOU, P.; LI, Q.; WANG, Y.; ZHANG, P.; CHENG, X. Improving the carbonation resistance of supersulfated cement by nano SiO_2 and silica fume. **Cement and Concrete Composites**, v. 158, 2025, art. 105984. DOI: https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2025.105984.

COLLA, R. A.; THALHEIMER, J. S.; KICH DE RÉ, J.; BALDIN, V.; ANGULSKI, C. Influência das condições de cura no comportamento do cimento supersulfatado (CSS) sujeito à carbonatação. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 66., 2025, Curitiba. **Anais** [...]. Curitiba: IBRACON, 2025.

DALLA VECCHIA, F. **Avaliação da degradação por CO_2 supercrítico da pasta de cimento Portland.** 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Tecnologia de Materiais) – Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.

GIJBELS, K. et al. Effect of NaOH content on hydration, mineralogy, porosity and strength in alkali/sulfate-activated binders from ground granulated blast furnace slag and phosphogypsum. **Cement and Concrete Research**, v. 132, 106037, 2020.

GONG, Y. et al. The synergistic effect of silica fume and γ-C_2S on the carbonation resistance of supersulfated cement. **Developments in the Built Environment,** v. 25, 100868, 2026.

JIA, X.; LING, T.-C.; MEHDIZADEH, H.; MO, K. H. Impact of CO_2 curing on the microhardness and strength of 0.35 w/c cement paste: comparative study of internal/surface layers. **Journal of Materials Research and Technology**, v. 9, n. 5, p. 11849–11860, 2020. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.08.051.

KICH DE RÉ, J. **Influência da composição química do cimento supersulfatado sujeito à carbonatação natural.** 2025. 137 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco, 2025.

LIAO, Y.; YAO, J.; FANG, D.; LI, H.; WANG, K.; TANG, S. Hydration behavior and strength development of supersulfated cement prepared by calcined phosphogypsum and slaked lime. **Journal of Building Engineering,** v. 80, 2023, 108075. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jobe.2023.108075.

PNUMA. **Você sabe como os gases de efeito estufa aquecem o planeta**? Nairobi: UNEP, 2022. Disponível em: https://www.unep.org/pt-br/noticias-e-reportagens/reportagem/voce-sabe-como-os-gases-de-efeito-estufa-aquecem-o-planeta. Acesso em: 16 mar. 2026.

SHEN, Q.; PAN, G.; ZHAN, H. Effect of interfacial transition zone on the carbonation of cement-based materials. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 29, n. 7, 2017.

SNIC. Relatório anual 2024. Rio de Janeiro: **Sindicato Nacional da Indústria do Cimento**, 2024. Disponível em: http://snic.org.br/assets/pdf/relatorio_anual/1763075552.pdf. Acesso em: 16 mar. 2026.

THALHEIMER, J.; COLLA, R. A.; KICH DE RÉ, J.; BALDIN, V.; ANGULSKI DA LUZ, C. Influência da relação a/c no comportamento do cimento supersulfatado (CSS) sujeito à carbonatação. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 66., 2025, Curitiba. **Anais [...].** Curitiba: IBRACON, 2025.

VIEIRA, A. de A. P. **Microdureza aplicada ao estudo do dano em revestimentos compósitos para superfícies metálicas.** 2010. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2010.

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. DOI: https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2015.10.018.