CAPÍTULO 33 · Parte II · Materiais
DOI do capítulo: https://doi.org/10.67775/01rgc542
Trabalho apresentado no CBPAT 2026 e publicado nos anais do evento: https://doi.org/10.67775/k0697734

INFLUÊNCIA DA EXPOSIÇÃO AO AR E DA CURA IMERSA NA MICRODUREZA DO CIMENTO SUPERSULFATADO (CSS) SUBMETIDO À CARBONATAÇÃO NATURAL

Rafael Antonio Colla[1]*; Jeovana Thalheimer[1]; Isabel Cristina Magro[2]; Julia Kich de Ré[3]; Vitor Baldin[4] e Caroline Angulski da Luz[5]
*Autor de contato: rafaelcolla@alunos.utfpr.edu.br[1]

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

RESUMO

O concreto é o segundo material mais consumido no mundo, ficando atrás apenas da água, sendo o cimento Portland seu principal aglomerante. Entretanto, a produção desse cimento está associada a elevadas emissões de CO_2, o que impulsiona a busca por alternativas mais sustentáveis. Nesse contexto, o cimento supersulfatado (CSS) destaca-se por apresentar baixo teor de clínquer, sendo composto predominantemente por escória de alto-forno, gipsita e uma pequena fração de ativador alcalino. Apesar das vantagens ambientais, o CSS apresenta maior suscetibilidade à carbonatação, fenômeno que altera a matriz cimentícia, reduz a alcalinidade do meio e pode comprometer o desempenho mecânico do material. Este estudo teve como objetivo investigar a influência de duas condições de cura no comportamento do CSS frente à carbonatação. Foram moldados corpos de prova em pasta e submetidos às condições de exposição ao ar e cura submersa em solução de água com cal. As amostras foram avaliadas aos 0, 4, 12 e 28 semanas por meio de ensaios de microdureza Vickers.
Palavras-chave: cimento supersulfatado; carbonatação; cura; micro dureza.

ABSTRACT

Concrete is the second most consumed material in the world, surpassed only by water, with Portland cement as its main binder. However, the production of this cement is associated with high CO_2 emissions, which has driven the search for more sustainable alternatives. In this context, supersulfated cement (SSC) stands out due to its low clinker content, being predominantly composed of ground granulated blast furnace slag, gypsum, and a small fraction of alkaline activator. Despite its environmental advantages, SSC presents greater susceptibility to carbonation, a phenomenon that alters the cementitious matrix, reduces the alkalinity of the medium, and may compromise the mechanical performance of the material. This study aimed to investigate the influence of two curing conditions on the carbonation behavior of SSC. Paste specimens were cast and subjected to air exposure and submerged curing in lime-saturated water. The samples were evaluated at 0, 4, 12, and 28 weeks through Vickers microhardness tests.
Keywords: abstract; recommendations; standardization.

1. INTRODUÇÃO

O cimento Portland apresenta elevado impacto ambiental, principalmente em função das significativas emissões de dióxido de carbono (CO_2) associadas ao seu processo produtivo. Estima-se que aproximadamente 7% das emissões globais de CO_2 estejam relacionadas à fabricação do clínquer (Verdani, 2025). Diante desse cenário, tornam-se cada vez mais relevantes as pesquisas voltadas à redução do consumo de clínquer, especialmente aquelas que conciliam menor utilização de matérias-primas naturais e a mitigação da degradação ambiental decorrente da exploração de novas áreas para deposição de resíduos industriais (Trentin, 2020). Nesse contexto, o cimento supersulfatado (CSS) destaca-se como uma alternativa potencialmente mais sustentável, por ser constituído majoritariamente por escória de alto-forno, reduzindo significativamente a demanda por clínquer em sua composição. Entretanto, apesar das vantagens ambientais, o CSS apresenta maior suscetibilidade à carbonatação. Esse fenômeno ocorre quando o CO_2 atmosférico penetra na matriz cimentícia, promovendo a redução do pH e podendo comprometer a durabilidade das estruturas, especialmente no caso do concreto armado, em razão da possível despassivação das armaduras. Assim, o presente artigo tem como objetivo analisar, em diferentes idades, a influência das condições de cura ao ar e submersa em água com cal no processo de carbonatação do cimento supersulfatado (CSS).

2. METODOLOGIA

2.1 Materiais

2.1.1 Escória de alto-forno

A escória granulada de alto-forno utilizada foi a mesma empregada por Kich de Ré (2025). O material foi previamente seco, triturado e peneirado em peneira com abertura de 150 μm. A massa específica foi determinada pelo método do frasco de Le Chatelier, conforme a ABNT NBR 16605, resultando em 2,80 g/cm³. A superfície específica foi obtida pelo método de Blaine, conforme a ABNT NBR 16372, apresentando valor de 3657 cm²/g.

2.1.2 Sulfato de Cálcio

A fonte de sulfato de cálcio utilizada foi gesso calcinado a 650 °C em mufla por 1 hora, com taxa de aquecimento de 30 °C/min, com o objetivo de converter o sulfato de cálcio hemidratado para a forma anidra, usualmente empregada em cimentos supersulfatados devido à sua solubilidade intermediária (Kich de Ré, 2025). A massa específica foi determinada pelo frasco de Le Chatelier (ABNT NBR 16605), obtendo-se 2,66 g/cm³. O material empregado foi o mesmo utilizado por Kich de Ré (2025).

2.1.3 Ativador Alcalino

O ativador alcalino adotado foi o cimento Portland CP V-ARI (alta resistência inicial), selecionado em função de sua elevada alcalinidade. Quando incorporado às pastas de cimento supersulfatado (CSS), promove aumento significativo do pH nas primeiras horas de hidratação, podendo atingir valores próximos a 12,5 e estabilizando-se posteriormente em torno de 12 (Schuster, 2019). Para

esse material, foram considerados os valores informados pelo fabricante: massa específica de 3,12 g/cm³ e superfície específica de 4911 cm²/g.

2.1.4 Agregado Miúdo

O agregado miúdo utilizado foi composto por areias padrão IPT (nº 16, 30, 50 e 100), conforme a ABNT NBR 7214. A massa específica foi determinada pelo método do picnômetro, de acordo com a ABNT NBR 16916, resultando em 2,62 g/cm³.

Tabela 1 – Composição físico-química dos materiais

Composição química	Teores Escoria (%)	Teores Sulfato de Calcio (%)	Teores Ativador Alcalino (%)
CaO	46,80	38,50	38,50
SiO_2	35,0	0,3	18,3
AL_2O_3	7,60	0,10	4,30
MgO	5,60		5,80
MnO	1,80		
SO_3	1,0	54,1	2,40
TiO_2	0,60		
F_2O_3	0,60		3,00
K_2O	0,50		0,89
SrO	0,20	0,20	
Na_2O	0,10		0,16
CO_2			4,10
BaO	0,10		
ZrO_2	-		
Y_2O_3	<0,1		
P_2O_5	<0,1		
Perda ao fogo	-0,47		
CaO + MgO + SiO_2	87,4		
(CaO + MgO) / SiO_2	1,60		

Fonte: os autores.

2.2 Método

2.2.1 Preparação das Pastas

As pastas foram produzidas com 84% de escória granulada de alto-forno, 15% de gesso calcinado a 650 °C e 1% de ativador alcalino (CP V-ARI), em relação água/aglomerante de 0,50.

O procedimento de mistura consistiu na homogeneização prévia dos materiais secos, seguida da adição da água por 30 s. Posteriormente, realizou-se mistura manual por 30 s com haste de vidro para incorporação inicial. A pasta foi então submetida à mistura mecânica em baixa rotação por 90 s, seguida de 30 s de homogeneização manual para garantir uniformidade e evitar segregação, e finalizada com mais 60 s de mistura mecânica em baixa rotação.

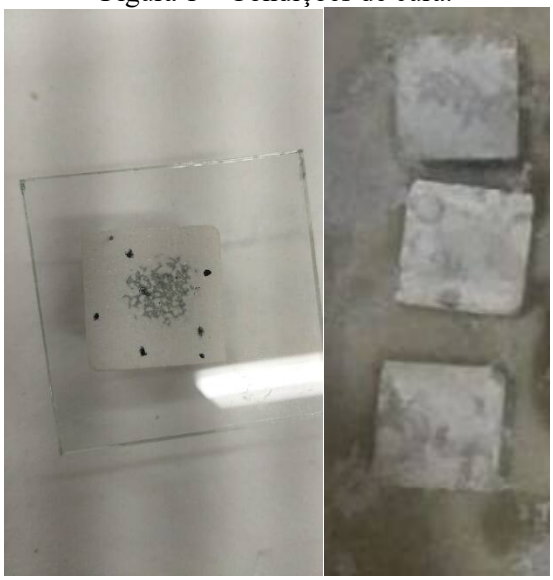
Após o preparo, a pasta foi moldada em corpos de prova cúbicos com dimensões de 3 × 3 × 3 cm, previamente lubrificados com desmoldante. O adensamento foi realizado manualmente com auxílio de colher metálica, buscando minimizar a incorporação de ar.

2.2.3 Cura e exposição a carbonatação

Após a desmoldagem, os corpos de prova de pasta foram submetidos à cura em solução saturada de hidróxido de cálcio, preparada na proporção de 3 g de cal hidratada por litro de água.

Aos 28 dias de idade, os corpos de prova foram divididos em dois grupos experimentais: Expostos ao ar – amostras mantidas em ambiente laboratorial com uma temperatura média de 23°C uma concentração de CO_2 de 0,05% e umidade média de 59%. Submersos em agua com hidróxido de cálcio.

Figura 1 – Condições de cura.



Fonte: os autores.

2.2.5 Ensaio de Dureza

Foram utilizados corpos de prova moldados em pasta, com dimensões de 3 × 3 × 3 cm, submetidos a períodos de 0, 4, 12 e 28 semanas de exposição à carbonatação, nas condições ao ar e submersos. Antes da realização dos ensaios, as superfícies dos corpos de prova foram preparadas por meio de lixamento uniforme com lixa de grão 1200, com o objetivo de remover irregularidades superficiais e garantir melhor acabamento. Posteriormente, realizou-se o polimento da superfície para assegurar maior precisão nas medições de microdureza. A identificação das regiões carbonatadas e não carbonatadas foi realizada mediante aspersão de solução alcoólica de fenolftaleína, que permite a distinção visual das áreas com redução de pH. O ensaio de microdureza foi conduzido em equipamento de microdureza Vickers (Figura 2), com aplicação de carga de 1,98 N durante 30 segundos. As diagonais das impressões foram medidas por meio do microscópio acoplado ao equipamento, possibilitando o cálculo da dureza correspondente. Para cada corpo de prova, foram realizadas cinco medições em regiões internas (não carbonatadas) e cinco em regiões externas (carbonatadas). A partir dos resultados obtidos, foram elaborados gráficos comparativos, permitindo a análise da influência das diferentes condições de cura e dos tempos de exposição no comportamento do material.

Figura 2 – Microdureza Vickers.



Fonte: os autores.

Figura 3 – Corpos de Prova ao ar e imerso com fenolftaleina.

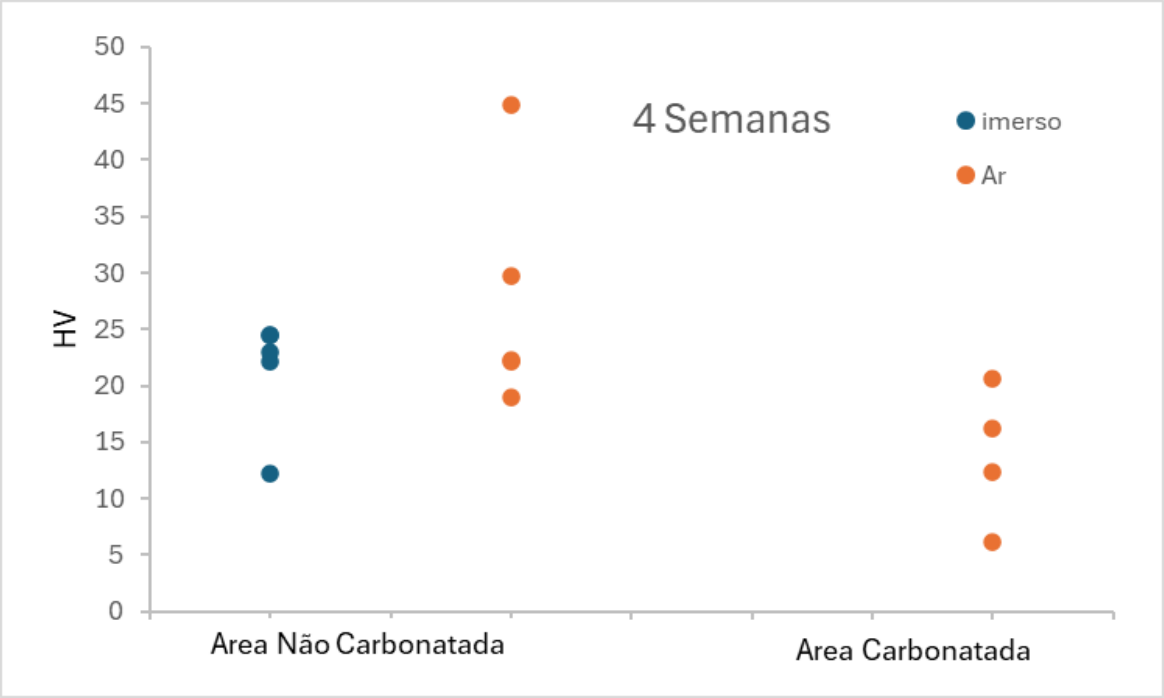


Fonte: os autores.

3. RESULTADOS

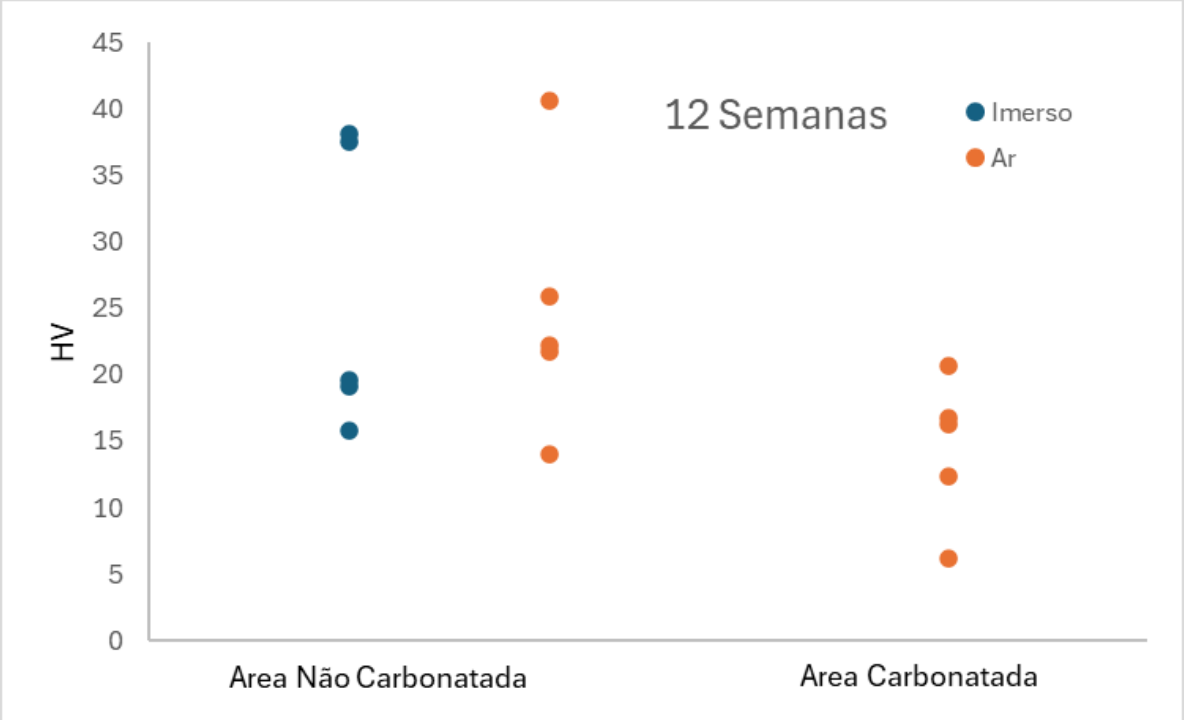
3.2 Ensaio de Dureza em Pasta

Figura 4 – Gráfico de micro dureza Vicker 4 semanas.



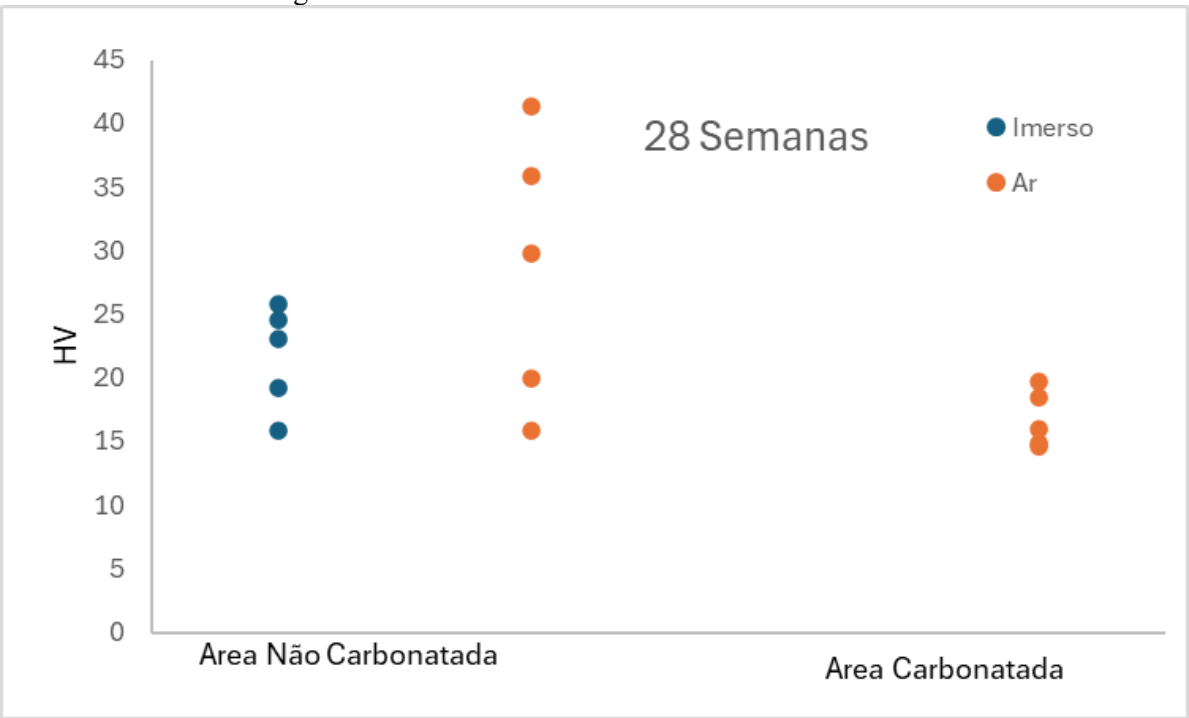
Fonte: os autores.

Figura 5 – Gráfico de micro dureza Vicker 12 semanas.



Fonte: os autores.

Figura 6 – Gráfico de micro dureza Vicker 28 semanas.



Fonte: os autores.

Em todas as idades analisadas, as regiões carbonatadas apresentaram valores de microdureza inferiores quando comparadas às regiões não carbonatadas, evidenciando que o processo de carbonatação promove alterações microestruturais capazes de reduzir a resistência superficial do material.

Com 4 semanas, os corpos de prova expostos ao ar apresentaram, na região interna (não carbonatada), valores de microdureza superiores aos observados nos espécimes mantidos imersos em solução de água com cal. Com 12 semanas, os valores tornaram-se semelhantes entre as duas condições. Já com 28 semanas, observou-se novamente microdureza interna superior nos corpos de prova expostos ao ar em comparação aos imersos.

Destaca-se que os corpos de prova mantidos em solução saturada de hidróxido de cálcio não apresentaram frente de carbonatação ao longo do período analisado, razão pela qual os gráficos referentes a essa condição contemplam exclusivamente medições em regiões não carbonatadas. Esse resultado indica que a cura imersa foi eficaz na prevenção da penetração de CO_2, mantendo a alcalinidade do sistema.

4. CONCLUSÃO

O presente estudo teve como objetivo analisar, aos 0, 4, 12 e 28 semanas, o comportamento da carbonatação em sistemas à base de cimento supersulfatado (CSS), considerando duas condições de cura.

Os resultados de microdureza evidenciaram que, em todas as idades avaliadas, as regiões carbonatadas apresentaram valores inferiores quando comparadas às regiões não carbonatadas, indicando que o avanço da carbonatação promove alterações na matriz cimentícia capazes de reduzir sua resistência superficial. Esse comportamento reforça a elevada sensibilidade do CSS à redução de alcalinidade decorrente da penetração de CO_2.

Observou-se ainda que os corpos de prova mantidos em cura imersa em solução saturada de hidróxido de cálcio não apresentaram frente de carbonatação ao longo do período analisado, demonstrando a eficácia desse regime na preservação do material. Por outro lado, as amostras expostas ao ar desenvolveram regiões carbonatadas progressivamente ao longo do tempo.
Em relação às regiões internas não carbonatadas, verificou-se variação nos valores de microdureza entre as condições de cura ao longo das idades, sugerindo que o ambiente de exposição influencia o desenvolvimento microestrutural do CSS.
Conclui-se, portanto, que o CSS apresenta suscetibilidade significativa à carbonatação quando exposto ao ar, sendo as condições de cura determinantes para seu desempenho ao longo do tempo. Dessa forma, destaca-se a importância da adoção de regimes de cura adequados para garantir maior estabilidade microestrutural e durabilidade do material.

5. AGRADECIMENTOS

Agradeço ao CNPq (046517/2023-1) pelo suporte financeiro, ao programa Pbic/UTFPR, e a Central de Análises da UTFPR.

REFERÊNCIAS

VERDIANI, V. B.; YAMAJI, F. M.; LIMA, L.; BELINI, G. Visão geral sobre o processo de coprocessamento na indústria do cimento no Brasil. Ambiente Construído, Porto Alegre, v. 25, e140295, jan./dez. 2025.

TRENTIN, Priscila Ongaratto. Comportamento do cimento supersulfatado (CSS) exposto ao ataque por sulfatos de origem externa. 2020. Dissertação (Mestrado em Programa de Pos-Graduação em Engenharia Civil) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco, 2020.

Ré, Julia Kich de. Influência da composição química do cimento supersulfatado sujeito à carbonatação natural. 2025. Dissertação (Mestrado em Programa de Pós- Graduação em Engenharia Civil) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco, 2025.

SCHUSTER, Geciele Caroline. Avaliação de diferentes ativadores alcalinos nas propriedades do cimento supersulfatado (CSS). 2019. Dissertação (Mestrado em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco, 2019