XV SBTA Simpósio Brasileiro de Tecnologia das Argamassas
Porto Alegre/RS - 11 a 13 de junho de 2025

EFEITO DO ENVELHECIMENTO ACELERADO E CARBONATAÇÃO NAS PROPRIEDADES DE UMA ARGAMASSA DE REVESTIMENTO

Effect of Ageing Cycles and Carbonation on the Properties of a Rendering Mortar

CLAUDIO DE SOUZA KAZMIERCZAK[1], MONIQUE PALAVRO LUNARDI [2], CAMILA WERNER[3], SIMONE HEINECK TAVARES[4]

[1] Professor Doutor, PPGEC, Universidade do Vale do Rio dos Sinos, claudiok@unisinos.br
[2] Mestre, PPGEC, Universidade do Vale do Rio dos Sinos, monique.lunardi@lme.pcc.usp.br
[3] Mestre, PPGEC, Universidade do Vale do Rio dos Sinos, camila-wm@hotmail.com
[4] Mestre, PPGEC, Universidade do Vale do Rio dos Sinos, simone.heineck81@gmail.com

RESUMO

Revestimentos aplicados sobre substrato de blocos de cerâmica vermelha foram submetidos a carbonatação acelerada e a ciclos de envelhecimento acelerado por ciclagem de temperatura e choque térmico, sendo avaliadas as alterações de resistência de aderência e absorção de água, em macro escala, e do módulo de elasticidade, em micro escala. Observou-se que os revestimentos sofrem danos em função do envelhecimento acelerado, aumentando a porosidade e diminuindo seu módulo de elasticidade. A carbonatação isoladamente aumenta a aderência dos revestimentos, mas nestes o processo de envelhecimento acelerado gera mais microfissuras, igualando o comportamento de argamassas carbonatadas e não carbonatadas.

Palavras-chave: Argamassa de revestimento. Envelhecimento acelerado. Carbonatação. Módulo de elasticidade.

ABSTRACT

This work evaluates the joint effect of carbonation and accelerated ageing cycles on renderings. Rendering mortars applied to a ceramic block substrate were subjected to accelerated carbonation and dry-wet cycles, and the changes in bond strength and water absorption were assessed on a macro scale, as well as the modulus of elasticity on a micro scale. It was observed that the renderings are damaged by accelerated ageing, increasing their porosity and decreasing their modulus of elasticity. Carbonation increases the adherence of renderings, but the ageing process causes more microcracks in these mortars, equalizing the properties of carbonated and non-carbonated mortars.

Key-words: Rendering mortar. Ageing. Carbonation. Elasticity modulus.

Como citar:
KAZMIERCZAK, C.S.; LUNARDI, M.P.; WERNER, C.; TAVARES, S.H. Efeito do envelhecimento acelerado e carbonatação nas propriedades de uma argamassa de revestimento. XV SBTA 2025. In: XV SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DAS ARGAMASSAS, 2025, Porto Alegre. **Anais**... Porto Alegre: ANTAC, 2025.

INTRODUÇÃO

As argamassas de revestimento são sujeitas a um processo de cura precário, que geralmente resulta em retração excessiva, baixo grau de hidratação do material cimentício e deficiências na extensão e resistência de aderência [1][2][3][4].

Ao longo do tempo, estes revestimentos são expostos a um processo contínuo de carbonatação, que diminui a sua porosidade interna, aumenta a dureza, a resistência a compressão e o módulo de elasticidade. Desta forma, é esperada uma significativa alteração na microestrutura do revestimento, em relação a suas propriedades nas idades iniciais.

A carbonatação de argamassas tem sido muito comentada nos últimos anos, em função de seu potencial de retenção de CO_2. Entretanto, sob o ponto de vista técnico, há discussões sobre sua influência na durabilidade dos sistemas de revestimento. Estima-se que as modificações de microestrutura provenientes da carbonatação podem beneficiar as argamassas, mas não há consenso sobre o tema, pois apesar de aumentar a resistência mecânica e diminuir a porosidade dos revestimentos, ela proporciona retração e aumento no módulo de elasticidade, o que pode gerar microfissuração em situações em que o revestimento esteja sujeito a gradientes térmicos [5][6][7].

Especialmente em argamassas que compõem o sistema de vedação externo das edificações o sistema de vedação também está exposto a variações significativas de umidade e de temperatura, que geram gradientes volumétricos que podem originar microfissuras, e consequentemente diminuir a resistência mecânica e aumentar a permeabilidade do revestimento.

O efeito sinérgico destes dois processos é preponderante na definição da durabilidade do sistema de revestimento. Um sistema mais elástico e com menor absorção de água pode suportar melhor os efeitos das variações volumétricas, gerando uma menor quantidade de microfissuras e menor tensão de cisalhamento na interface com o substrato [8]. Por este motivo, é recomendado que as argamassas possuam baixo módulo de elasticidade [9][10].

Há uma grande quantidade de estudos sobre carbonatação em concretos e pastas de cimento, mas poucos relacionados com argamassas de revestimento [11][12][13]. Os estudos sobre a ação do meio ambiente na degradação da microestrutura de argamassas de revestimento são bem menos frequentes que os de carbonatação, e normalmente são realizados em argamassas com pequena idade (na ordem de meses), a partir de diversos tipos de ensaios de envelhecimento acelerado [14]. Em geral, observa-se os ensaios que utilizam ciclos de molhagem e secagem diminuem gradualmente a resistência a fratura dos revestimentos, especialmente em argamassas com maior teor de pasta [15].

A partir de revisão bibliográfica sobre o tema, constata-se a quase inexistência de estudos que avaliam processos de envelhecimento de revestimentos de forma sistêmica, e de modo particular, que avaliem o efeito simultâneo do envelhecimento acelerado e da carbonatação em argamassas de revestimento [16].

No presente trabalho, é avaliado o efeito de ciclos térmicos na durabilidade e aderência de argamassas de revestimento submetidas à carbonatação, a partir de técnicas macro e microestruturais.

MATERIAIS E MÉTODOS

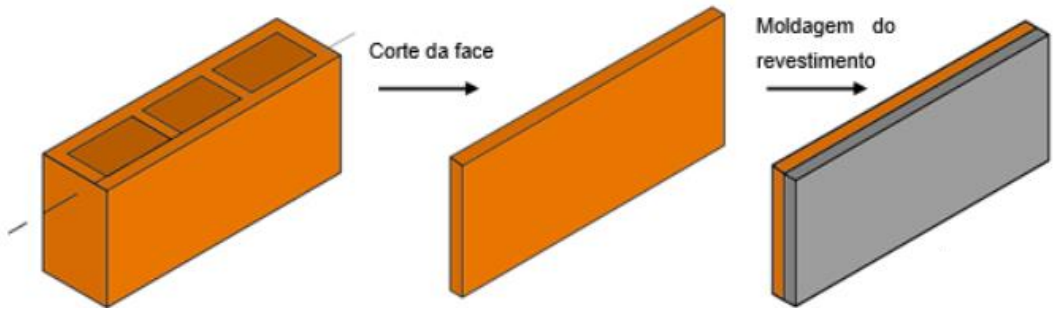
Uma argamassa a base de cimento Portland foi aplicada, na espessura de 20mm, sobre substrato de cerâmica vermelha. Após 190 dias de cura, metade dos exemplares foram submetidos a carbonatação acelerada. Metade de cada um destes dois grupos iniciais sofreram envelhecimento acelerado por meio de ciclos de aquecimento e choque térmico por molhagem, o que resultou em quatro grupos de estudo, identificados como NC – não carbonatado, NC E – não carbonatado envelhecido, C – carbonatado, e C E – carbonatado e envelhecido.

O substrato utilizado consiste em blocos cerâmicos de estruturais com resistência a compressão de 7 MPa, absorção de água total de 11,37% , coeficiente de capilaridade de 0,55 g/cm2.h1/2 (determinado segundo a RILEM TC 116 PCD [17]) rugosidade Ra = 470nm e resistência à tração superficial de 0,91 MPa.

A argamassa de referência (NC) foi elaborada com cimento Portland CPV ARI, no traço 1:4 (em volume), com relação a/c 0,9 e aditivo superplastificante. Foi utilizado cimento Portland CPV ARI com a seguinte distribuição granulométrica: D10 = 6,17 µm, D50=11,54 µm e D90 = 21,63 µm. O agregado miúdo consitiu numa areia fina com Dmáx=1,8mm e MF= 0,88. O aditivo utilizado é um superplastificante tipo II – RA2 com densidade de 1,05g/cm3. A areia utilizada e o traço adotado foram definidos a partir de um estudo prévio visando obter uma argamassa coesa e que gere uma resistência de aderência ao substrato cerâmico de no mínimo 0,4 MPa, com ruptura predominante na interface argamassa/substrato.

A argamassa, após 190 dias de cura, apresentou a resistência à compressão de 10,43MPa, módulo de elasticidade dinâmico de 18,7GPa e índice de vazios de 22,86%. Esta argamassa, aplicada sobre o substrato cerâmico (Figura 1), possui uma resistência de aderência à tração média aos 28 dias de idade de 0,48MPa com aproximadamente 80% das rupturas na interface argamassa/substrato. Esta resistência subiu para 0,99MPa aos 190 dias.

Figura 1 – Esquema de moldagem dos sistemas de revestimento.



Fonte: Os autores (2025).

A cura de todos os revestimentos foi realizada por 190 dias em câmara úmida com umidade relativa de 95±5%. Esse elevado tempo de cura teve a finalidade de garantir que o cimento Portland alcançasse um elevado grau de hidratação antes de se iniciar os processos de carbonatação e envelhecimento acelerados. Para permitir a comparação entre os valores de resistência de aderencia observados nesta idade com a idade usualmente utilizada em

trabalhos da área, também foram moldados exemplares para determinação da aderência aos 28 dias.

Após a cura por 190 dias, os exemplares a serem submetidos a carbonatação passaram por um processo de sazonamento por 28 dias em câmara com 60±5% de umidade, e posteriormente foram submetidos a carbonatação em câmara com 5% de CO2 e umidade de 60±5% por 235 dias (idade em que os revestimentos foram consideradas totalmente carbonatados).

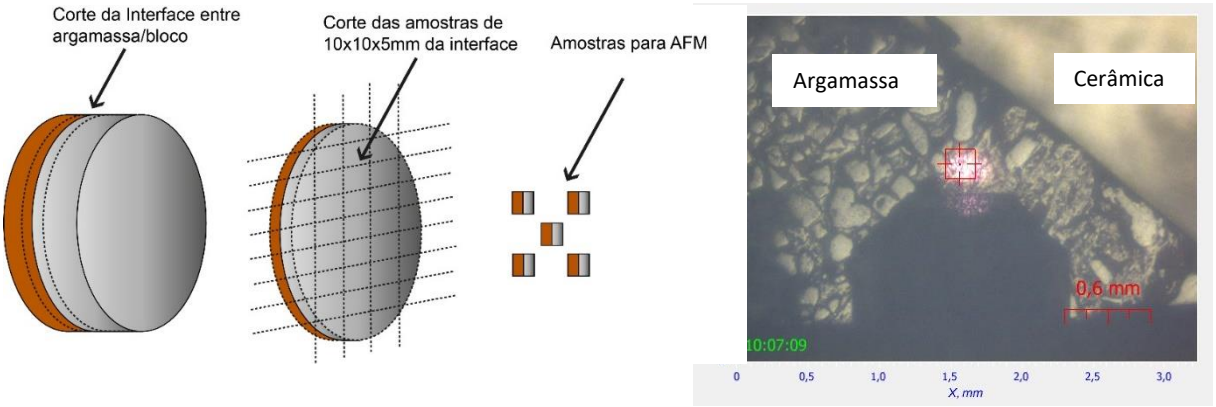
O envelhecimento acelerado, obtido a partir de 20 ciclos de aquecimento até 80oC seguidos de resfriamento brusco por molhagem foi realizado de acordo com o procedimento descrito na norma ABNT NBR 15575:2013 - parte 4 [18].

As variáveis de resposta foram a resistência de aderência à tração do revestimento, o índice de vazios e o módulo de elasticidade da argamassa, antes e depois dos processos de carbonatação e intemperismo.

A resistência de aderência à tração dos corpos de prova foi realizada conforme norma ABNT NBR 13528 [19] em 12 corpos de prova utilizando-se um dinamômetro de tração Dinatest modelo DS2-DPU-1100.

A determinação do módulo de elasticidade foi realizada de duas formas: uma análise macroestrutural determinando-se o módulo de elasticidade dinâmico de prismas de argamassa 40x40x160mm moldados com a argamassa de revestimento e submetidos às mesmas de condições de cura e exposição dos sistemas de revestimento, utilizando o método especificado na norma ABNT NBR 8802 [20] e um equipamento Proceq Pundit Lab+, com transdutores de 54kHz, e uma segunda análise em nível microestrutural, em amostras de 10x10mm extraidas dos corpos-de prova de argamassa aplicada sobre o substrato cerâmico (Figura 2), que após polimento foram analisadas em um microscópio de força atômica NT-MDT modelo Solver Next.

Figura 2 – Esquema representativo do preparo das amostras para MFA e identificação da região de análise (de 50 x 50µm – no centro da região idenficada em vermelho).



Fonte: Os autores (2025).

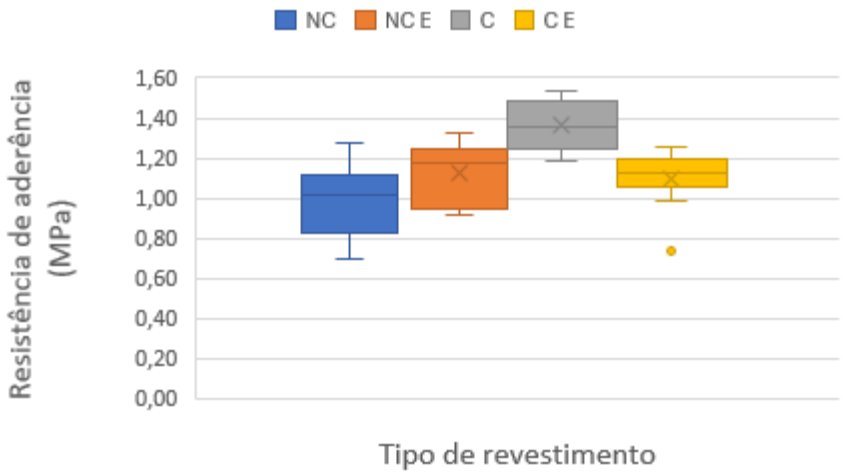
Em cada área analisada (com dimensões de 50x50µm) foram amostrados 500x500 pontos. Foi utilizada uma ponteira do tipo contato, modelo CSG10 linha ouro. As amostras foram varridas com um setpoint de 2nA e gain=1.

APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DE RESULTADOS

A resistência de aderência à tração média das argamassas não carbonatadas na idade de 28 dias foi de 0,48MPa. Aos 190 dias, idade especificada para início dos processos de carbonatação e de envelhecimento acelerado, esta resistência subiu para 0,99MPa. Observa-se que o aumento no grau de hidratação da argamassa propiciou um aumento expressivo na aderência. Estas argamassas foram consideradas como referência.

Na Figura 3 é possível visualizar os valores médios de resistência de aderência dos revestimentos avaliados (NC – não carbonatado, NC E – não carbonatado envelhecido, C – carbonatado, e C E – carbonatado e envelhecido).

Figura 3 – Resistência de aderência dos revestimentos.



Fonte: Os autores (2025).

Tendo como base de comparação a argamassa de referência, o processo de envelhecimento acelerado aumentou ligeiramente o valor médio de resistência de aderência e diminuiu o coeficiente de variação dos resultados. A análise estatística de variança (ANOVA com coeficiente de confiabilidade de 95%) entretanto, demonstra que a diferença entre as médias antes e após o envelhecimento não é significativa. A diminuição do coeficiente de variação possivelmente decorre do ensaio de envelhecimento acelerado proporcionar um processo de redistribuição de massa por dissolução e posterior precipitação na rede de poros da argamassa, atenuando a diferença dimensional entre os poros.

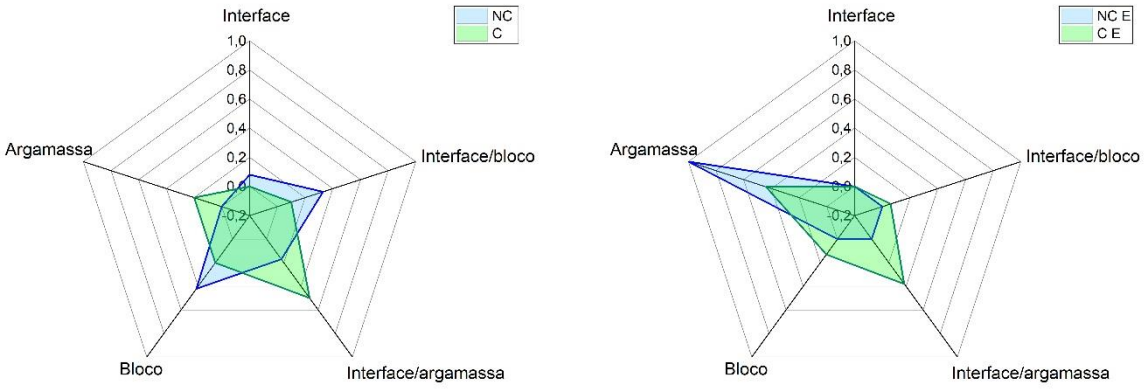
Embora não seja constatada diferença na resistência de aderência, a forma de ruptura se altera significativamente em função do processo de envelhecimento (Figura 4, argamassa NC E), apresentando, em todos os exemplares avaliados, a forma de ruptura coesiva. Neste tipo de argamassa (não submetida a carbonatação e envelhecida) também é observada uma

alteração na distância entre o local da ruptura e a interface com o substrato. Enquanto nos outros 3 tipos de argamassa a ruptura ocorre na interface ou em até 3mm desta região, nos exemplares não carbonatados e envelhecidos a ruptura ocorreu a cerca de 10mm da interface (região correspondente a metade da espessura do revestimento). Estes resultados sugerem que nestas argamassas os ciclos térmicos realizados foram capazes de gerar microfissuras na região mais próxima à superfície do revestimento, mas não degradaram a região mais próxima ao substrato.

A carbonatação dos revestimentos, avaliada de forma isolada, gerou um acréscimo significativo na resistência de aderência dos revestimentos (na ordem de 36%). Entretanto, a carbonatação não alterou significativamente a forma de ruptura dos revestimentos, conforme visualizado na Figura 4 (argamassas C e CE, em relação à argamassa NC, que é a argamassa de referência). Nestas três argamassas, a ruptura foi essencialmente do tipo adesiva.

Ao se analisar o efeito do processo de envelhecimento acelerado na argamassa previamente carbonatada, observa-se que ocorre uma queda significativa na resistência de aderência, que em função do envelhecimento volta à mesma ordem de grandeza da argamassa de referência. O processo de envelhecimento acelerado gera microfissuras na argamassa carbonatada, que praticamente anulam o acréscimo de resistência decorrente da carbonatação. Apesar da alteração na resistência de aderência, a forma de ruptura desta argamassa não se alterou significativamente.

Figura 4 – Forma de ruptura dos revestimentos.



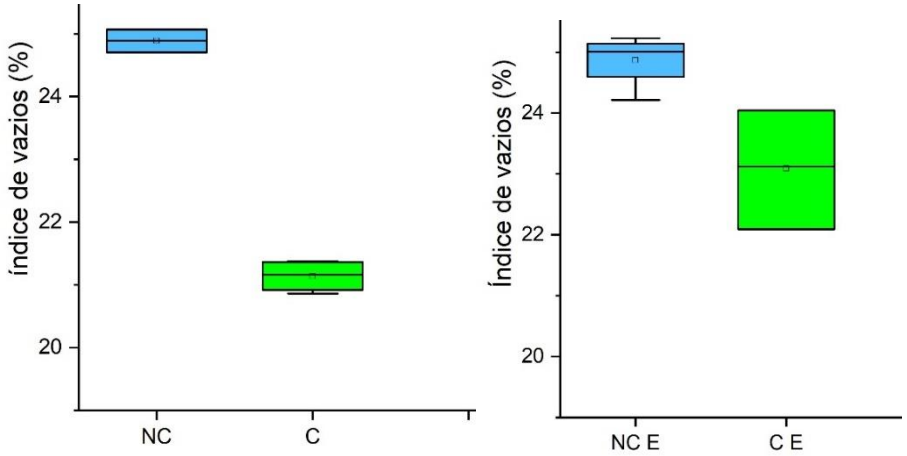
Fonte: Os autores (2025).

Na Figura 5 é visualizada a alteração no índice de vazios das argamassas em função da carbonatação e do envelhecimento acelerado.

A argamassa de referência possui um índice de vazios de 24,88%, dentro do esperado em argamassas cimentícias com ar aprisionado. A exposição ao processo de envelhecimento acelerado manteve o índice de vazios quase inalterado (24,89% na argamassa de referência NC e 24,87% na argamassa NC E), mas aumentou o seu desvio padrão (de 0,21 para 0,45), o que indica que os danos ocorridos no revestimento naõ se distribuem de forma homogênea,

sendo provavelmente maiores na superfície do revestimento e menores na interface com o substrato.

Figura 5 – Indice de vazios das argamassas de revestimento.



Fonte: Os autores (2025).

A carbonatação diminui o índice de vazios das argamassas, em acordo com o indicado na bibliografia. A argamassa NC possui um índice de vazios de 24,88%. Em função da formação e precipitação de compostos carbonatados, ocorreu uma diminuição do volume de poros na ordem de 15%, resultando num índice de vazios para a argamassa carbonatada C de 21,14%. O processo de envelhecimento da argamassa previamente carbonatada aumenta novamente o índice de vazios, que sobe na argamassa CE para 23,08%, com um desvio padrão de 0,98.

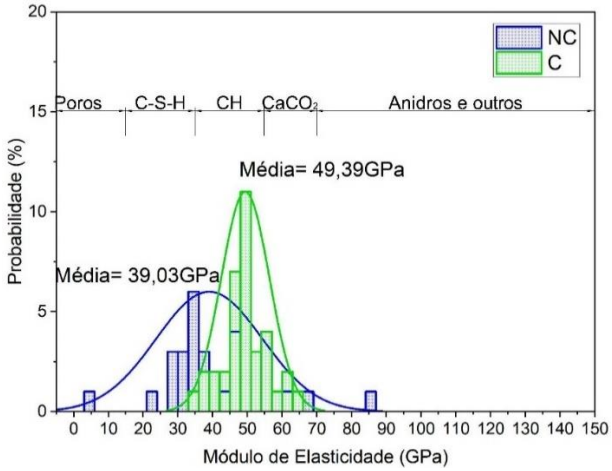
A porosidade aberta dos exemplares indica que o processo de envelhecimento da argamassa de referência pouco altera a sua porosidade, e que a diminuição da porosidade decorrente da carbonatação é significativamente perdida em função do processo de envelhecimento.

A avaliação do módulo de elasticidade das argamassas foi realizada de duas formas: em macroescala, por meio de ensaio dinâmico e em nano escala, utilizando-se um microscópio de força atômica.

A determinação do módulo de elasticidade dinâmico resultou em valores de módulo muito próximos entre si (NC 18,7GPa, NC E 17,0GPa C 19,3GPa e C E 17,1GPa). É possível observar uma tendência a aumento do módulo em função da carbonatação e de diminuição em função do envelhecimento acelerado. Entretanto, as diferenças são pouco significativas, indicando que o método utilizado não é eficiente para detectar as alterações.

A análise realizada em microescala, entretanto, traz resultados mais esclarecedores. Analisando a Figura 6 observa-se que a carbonatação gerou um aumento do módulo de elasticidade em relação à argamassa de referência (NC) de aproximadamente 10GPa. Este comportamento é coerente com o indicado pela literatura, que indica que o processo de carbonatação resulta na formação de compostos de maior resistência e consequentemente com módulo de elasticidade mais elevado.

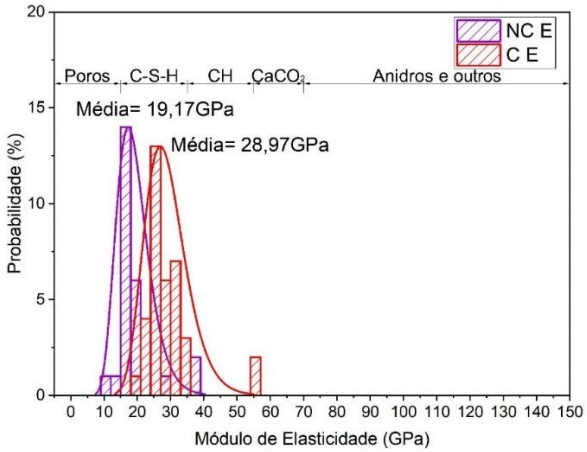
Figura 6 – Distribuição do módulo de elasticidade nas argamassas não envelhecidas.



Fonte: Os autores (2025).

Diversos autores associam os valores de módulo de elasticidade encontrados com os compostos identificados na matriz. No caso especifico, são esperados poros, C-S-H de baixa e alta densidade, CH, CaCO2, compostos anidros e outros [9][21]. Na Figura 6 é possível observar que a carbonatação deslocou a curva de densidade de módulo de elasticidade para a direita (aumentando a média) e diminuiu a variança da amostra. Há um substancial aumento na densidade de módulos na ordem de 50 a 70 GPa, indicando um aumento expressivo do teor de carbonato de cálcio decorrente da carbonatação e possível diminuição do teor de C-S-H.

Figura 7 – Distribuição do módulo de elasticidade nas argamassas envelhecidas.



Fonte: Os autores (2025).

Na Figura 7 é visualizada a alteração nos módulos de elasticidade em função do processo de envelhecimento acelerado. Há uma sensível queda no valor médio, que cai de 39,3GPa na argamassa de referência para 19,17GPa na argamassa NC E (queda de aproximadamente 50%) e para 28,97GPa na argamassa carbonatada e posteriormente envelhecida, demonstrando que o processo de envelhecimento acelerado resultou na propagação de microfissuras e diminuição da resistência mecânica e do módulo de elasticidade.

CONCLUSÕES

O processo de carbonatação aumenta o módulo de elasticidade de uma argamassa, especialmente quando se analisa a matriz em microescala, e diminui a sua porosidade. A carbonatação também aumenta a aderência da argamassa ao substrato, trazendo um aparente benefício para o sistema de revestimento. Entretanto, a exposição do revestimento a intempéries gera um quadro de microfissuração que praticamente anula os benefícios decorrentes da carbonatação.

Em uma argamassa não carbonatada, o envelhecimento gera grandes danos à sua microestrutura, alterando a forma de ruptura para coesiva. Entretanto, nos sistemas estudados, apesar de haver aumento na variabilidade da porosidade e diminuição no módulo de elasticidade, a aderência manteve-se inalterada, sugerindo que o efeito da intempérie é mais expressivo na região próxima à superfície do revestimento e diminui em função da proximidade ao substrato.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à CAPES pelas bolsas de Mestrado concedidas.

REFERÊNCIAS

[1] PAPADAKIS, V. G.; VAYENAS, C. G.; FARDIS, M. N. A reaction engineering approach to the problem of concrete carbonation. **AIChE Journal**, v. 35, n. 10, p. 1639–1650, 1989.

[2] MARTÍNEZ-RAMÍREZ, S.; FERNÁNDEZ-CARRASCO, L. Carbonation of ternary cement systems. **Construction and Building Materials**. v. 27, p. 313–318, 2012.

[3] CARASEK, H. **Aderência de argamassas à base de cimento Portland a substrato poroso – avaliação dos fatores intervenientes e contribuição ao estudo do mecanismo da ligação.** 1996. Tese (Doutorado em Engenharia) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1996.

[4] POLITO, G.; JUNIOR, A. N. DE C.; GOMES, P. R. Caracterização microestrutural da interface argamassa mista / bloco cerâmico. In: VIII Simpósio Brasileiro de Tecnologia das Argamassas, 2009, Curitiba. **Anais.** Porto Alegre: ANTAC, 2009. p. 11–17.

[5] LAWRENCE, R. M. et al. Effects of carbonation on the pore structure of non-hydraulic lime mortars. **Cement and Concrete Research**, v. 37, n. 7, p. 1059–1069, 2007.

[6] ERGENÇ, D.; FORT, R. Accelerating carbonation in lime-based mortar in high CO2 environments. **Construction and Building Materials**, v. 188, p. 314–325, 2018.

[7] MORAES, G. A. et al. Análise da profundidade de carbonatação em argamassas de revestimento com substituição parcial de areia natural por resíduo de construção civil (RCC). **Brazilian Journal of Development**, v. 4, n. 6, p. 3212–3225, 2018.

[8] THIERY, M. Modélisation de la carbonatation atmosphérique des matériaux cimentaires. Prise em comple des effets cinétiques et des modifications microstructurales et hydriques.

Engineering Sciences. Ecole des Ponts Paris Tech, 2005.

[9] HAN, J. et al. Microstructure Modification of Carbonated Cement Paste with Six Kinds of Modern Microscopic Instruments. **American Society of Civil Engineers**, p. 1–14, 2014

[10] CINCOTTO, M. A. et al. O Efeito da Carbonatação na Porosidade de Argamassas de Cimento , Cal e Cimento: Cal. In: 3 º Congresso Portuguees deArgamassas de Construção, 2010, Lisboa. **Anais**. Lisboa, LNEC, 201.

[11] JOHN, V.M. Repensando o papel da cal nas argamassas. In: V Simpósio Brasileiro de Tecnologia das Argamassas, 2003, São Paulo. In: V Simpósio Brasileiro de Tecnologia das Argamassas, 2003, São Paulo. **Anais.** Porto Alegre: ANTAC, 2003. v. 1. p. 47-63.

[12] SELMO, S.M.S. Prevenção de patologia em revestimentos externos de argamassa dos edifícios: a importância dos serviços de manutenção. In: Simpósio sobre Patologia das Edificações: Prevenção e Recuperação, 1989, Porto Alegre. **Anais**. Porto Alegre: UFRGS / NORIE, 1989. p. 195-212.

[13] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABTN). **NBR 13281**: Argamassas inorgânicas — Requisitos e métodos de ensaio: Elaboração. Rio de Janeiro: ABNT, 2023.

[14] ARIZZI, A.; VILES, H.; CULTRONE, G. Experimental testing of the durability of lime-based mortars used for rendering historic buildings. **Construction and Building Materials**, v. 28, n. 1, p. 807–818, 2012.

[15] DEHESTANI, A.; HOSSEINI, M.; TALEB BEYDOKHTI, A. Effect of wetting–drying cycles on mode I and mode II fracture toughness of cement mortar and concrete. **Theoretical and Applied Fracture Mechanics**, v. 106, n. December 2019, p. 102448, 2020.

[16] LUNARDI et al.. Synergistic effect of carbonation and dry-wet cycles on the adhesion, elastic modulus, and dimensional stability of rendering mortars - A multiscale approach. **Journal of Building Engineering**, v. 1, p. 110007, 2024.

[17] RÉUNION INTERNATIONAL DES LABORATOIRES D'ESSAIS ET MATÉRIAUX. Permeability of Concrete as a Criterion of its Durability: RILEM TC 116-PCD. **Materials and Structures / Materiaux et Constructions**, vol. 32, p. 174-179, Abr. 1999.

[18] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABTN). **NBR 15575 parte 4**: Edificações habitacionais — Desempenho Parte 4: Requisitos para os sistemas de vedações verticais internas e externas — SVVIE: Elaboração. Rio de Janeiro: ABNT, 2021.

[19] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABTN). **NBR 13528 parte 1 e parte 2**: Revestimento de paredes de argamassas inorgânicas — Determinação da resistência de aderência à tração: Elaboração. Rio de Janeiro: ABNT, 2019.

[20] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABTN). **NBR 8802**: Concreto endurecido — Determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica: Elaboração. Rio de Janeiro: ABNT, 2019.

[21] LI, W. et al. Interfacial transition zones in recycled aggregate concrete with different mixing approaches. **Construction and Building Materials**, v. 35, p. 1045–1055, 2012.