

# ANÁLISE EXPERIMENTAL DA EVOLUÇÃO DA CARBONATAÇÃO EM ARGAMASSAS DE CAL AÉREA<sup>1</sup>

OLIVEIRA, M., Universidade Federal do Pará, email: mateusengcivil@gmail.com; MORAES, B. N., Universidade Federal do Pará, email: bnmn@hotmail.com; ALMEIDA, E., Universidade Federal do Pará, email: emerson.sena.almeida@gmail.com; SANTOS, A., Universidade Federal do Pará, email: anandabispo\_@hotmail.com; REIS, V., Universidade Federal do Pará, email: reisvictoria.vdr@gmail.com; MACEDO, F., Universidade Federal do Pará, email: felip\_macedo@yahoo.com

## ABSTRACT

*For centuries, aerial lime has been frequently used as binder for preparing mortar in masonry buildings. Knowledge about the material behavior of aerial lime mortars is however still reduced, and contributions are necessary for better understanding its physical and mechanical properties, in this work, an experimental program is done to investigate the evolution of carbonation process. It starts with the definition of mortar composition, a typical composition is adopted. Specimens with reduced thickness were stored in three different chambers. The first chamber presents ordinary environmental conditions, while the other two environments present elevated humidity or CO<sub>2</sub> concentration. Thermogravimetric analysis was done at five ages, and the results indicate a progressive increase of the carbonation, however, an incomplete carbonation process was observed, therefore a normalization was adopted. The data show a faster carbonation process for the specimen stored in the chamber with elevated CO<sub>2</sub> and a reduced evolution of mortar stored in the humid chamber at the first ages.*

**Keywords:** Aerial lime. Carbonation. Thermogravimetric analysis. Preservation. Restoration.

## 1 INTRODUÇÃO

O estudo dos materiais utilizados nas construções e as interações com o ambiente são essenciais para a conservação do patrimônio histórico. Construções e monumentos históricos carregam consigo aspectos arquitetônicos, culturais, econômicos e sociais, justificando a preservação e a conservação das estruturas, com estudos que auxiliam no monitoramento estrutural e a avaliação desse tipo de estrutura (OLIVEIRA, 2016).

A utilização de argamassas com base em cal aérea para a construção de estruturas em alvenaria foi recorrente em várias fases da história (OLIVEIRA, 2016). As argamassas de cal sofrem significativas evoluções químicas e físicas ao longo do tempo, decorrentes do progressivo processo de carbonatação, responsável pela formação da estrutura sólida do material (OLIVEIRA *et al.* 2016). Para quantificar a extensão e a evolução deste fenômeno, é essencial compreender a química e a estrutura física subjacentes que afetam diretamente as propriedades mecânicas da argamassa e o seu desempenho estrutural. Nesse quesito, pode-se verificar que ainda há uma lacuna de pesquisas nessa linha de estudo na literatura brasileira.

<sup>1</sup> OLIVEIRA, M., MORAES, B. N., ALMEIDA, E., SANTOS, A., REIS, V., MACEDO, F. Análise experimental da evolução da carbonatação em argamassas de cal aérea. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 17., 2018, Foz do Iguaçu. **Anais...** Porto Alegre: ANTAC, 2018.

O presente estudo teve como objetivo contribuir para o avanço da pesquisa nessa área, com isso, a análise do processo de carbonatação foi realizada em discos de pequena espessura de argamassa à base de cal aérea submetidas a diferentes ambientes. Os discos foram submetidos a três ambientes e as análises foram concentradas nas idades iniciais do processo de carbonatação.

## 2 ASPECTOS EXPERIMENTAIS

Apresenta-se nessa seção informações sobre os aspectos experimentais, iniciando-se pela composição e produção da argamassa. Foi escolhida uma argamassa com o traço 1:1.3:3 (cal:água:agregado) em termos de volume. Esta escolha resultou de um processo iterativo com três tentativas prévias, tendo em conta considerações relativas a aspectos tão variados como a trabalhabilidade, o risco de fissuração nas primeiras idades, ou o respeito pelas proporções de mistura habitualmente encontradas em construções históricas. Para mais detalhes sobre a definição do traço, ver Oliveira (2016).

O método de mistura adotado foi o “*hot-lime mix*”, em coerência com vários trabalhos de investigação anteriores (OLIVEIRA, 2016) e também com a estratégia utilizada em diversas construções históricas (Margalha et al. 2011, Moropoulou et al. 1996). O processo de mistura foi feito de acordo com as recomendações da norma EN 196-1 (CEN, 2005), e seguiu a adição dos componentes na seguinte ordem: agregados (mistura de areias grossa e fina), cal e água. As misturas foram realizadas numa misturadora Würk® com capacidade de 3 litros e pá de mistura vertical, sendo o tempo total de amassadura de 300 segundos. A caracterização dos materiais, o que inclui, a curva granulométrica, as análises de termogravimetria (TGA) e fluorescência de raio-x, pode ser vista em Oliveira (2016).

## 3 RESULTADOS

Um aspecto importante no estudo da carbonatação é o fato de que os testes podem ser realizados com experimentos em ambientes acelerados ou naturais. Experimentos em condições aceleradas são frequentemente adotados devido à lentidão dos fenômenos. A aplicabilidade e o estudo do processo de carbonatação em ambientes com concentrações elevadas de CO<sub>2</sub> em corpos-de-prova com grandes dimensões ainda é um aspecto em desenvolvimento.

Este trabalho apresenta os resultados relativos aos efeitos do ambiente em discos com a dimensão de 2 cm de espessura, maiores detalhes podem ser vistos em Oliveira (2016). Os discos de argamassa foram utilizados para investigar a evolução do processo de carbonatação em diferentes ambientes. Para este estudo, três ambientes diferentes foram adotados. Os discos foram também armazenados na posição vertical. O foco do estudo estava nas idades iniciais (1, 4, 7, 14, 21 e 28 dias). Para cada idade e condições ambiente, os pesos das amostras para os testes TGA estão resumidos na Tabela 1.

Durante os testes, foi adotado um intervalo de temperaturas de 20-1000 °C com uma taxa de aumento de 10 °C/min. Os dados obtidos após a normalização para as três condições ambientes diferentes e cinco idades são apresentados na Figura 1. Analisando a tendência apresentada, o teor de carbonato de cálcio apresentou um aumento global ao longo do tempo, com o conseqüente aumento de  $R$ , para os três cenários.

Tabela 1 – Amostras coletadas para TGA

Idade	Peso da amostra (mg)		
	Padrão	Úmida	Elevada CO <sub>2</sub>
1 dia	62.82	55.67	57.62
7 dias	73.85	70.42	62.65
14 dias	61.39	80.02	58.28
21 dias	69.18	69.37	77.24
28 dias	71.94	56.44	67.55

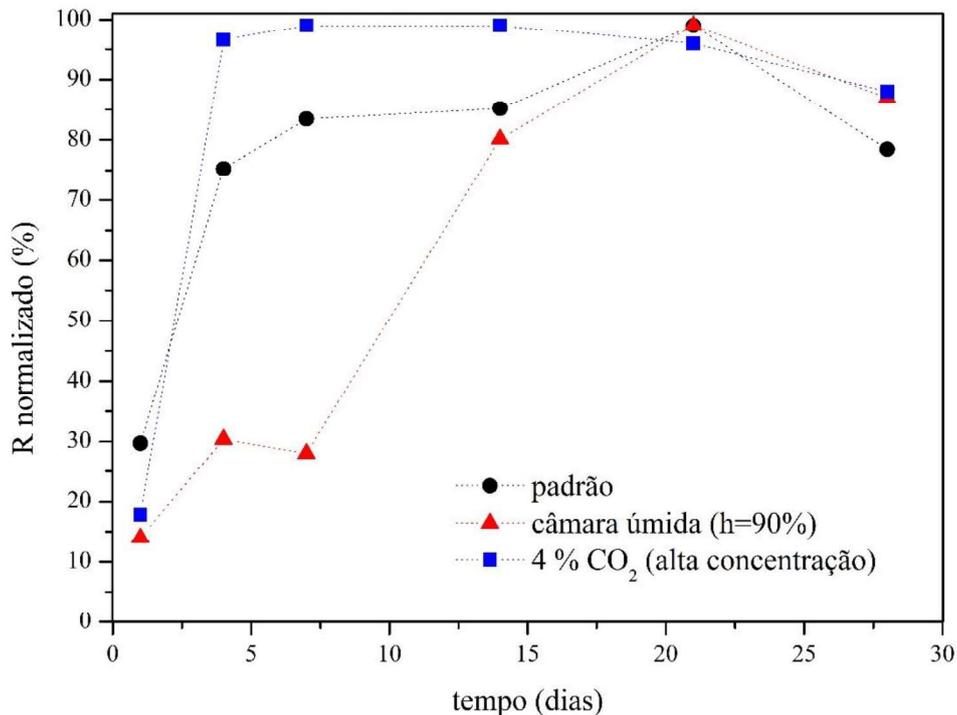
Fonte: Os autores

A tendência da taxa de carbonatação para a amostra armazenada na câmara “úmida” foi significativamente mais lenta nas primeiras idades (~6 dias) em comparação com os valores observados na amostra armazenada na condição “padrão”, então, acelerada até ~21 dias. Este comportamento pode ser explicado com o conceito de que os valores elevados de umidade dificultam a entrada inicial de CO<sub>2</sub>, retardando o processo de carbonatação nas primeiras idades (HOUST 1996; LAWRENCE 2006). Como pode ser observado, o pico do valor normalizado (ver Figura 1) ocorreu na idade de 14 dias para as amostras armazenadas na câmara com elevada concentração de CO<sub>2</sub>, e aos 21 dias para os discos armazenados dentro das outras duas condições ambientes. O processo de normalização pode ser visto em Oliveira (2016), Oliveira *et al.* (2016) e Oliveira *et al.* (2017) Após a normalização, os graus máximos de reação foram:  $R_{max} \approx 70\%$  aos 14 dias para a amostra armazenada na câmara de “elevado CO<sub>2</sub>”,  $R_{max} \approx 70\%$  na mesma idade para a amostra na condição padrão, e  $R_{max} \approx 99\%$  para o disco inserido no ambiente “úmido”.

Como as amostras foram armazenadas em diferentes condições ambientes, a normalização foi feita considerando o  $R$  máximo para cada grupo/cada condição estudada durante os testes. Para a amostra armazenada na câmara climática com 4% de CO<sub>2</sub>, os resultados mostram uma carbonatação rápida nas idades iniciais, aproximadamente até o 4º dia, indicando que a maior parte da carbonatação ocorreu por essa idade. Analisando a extensão da reação antes da normalização, para a amostra armazenada dentro da câmara “úmida”, a porcentagem foi maior e a amostra testada aos 21 dias apresentou um  $R \approx 99\%$ . De fato, o valor medido foi significativamente maior que os outros, devido a pequena quantidade de Ca(OH)<sub>2</sub> detectada nessa idade. Em todos os testes TGA realizados, este

resultado foi o único em que o  $R$  foi próximo de 100% antes da normalização. Este valor pode ser um “outlier”, visto que os resultados para o teste imediatamente depois, no 28º dia, mostraram uma porcentagem menor de  $\text{CaCO}_3$  e uma porcentagem maior de hidróxido de cálcio, e uma consequente diminuição do grau de carbonatação  $R \approx 0.87$ . Outra possibilidade para explicar o resultado é a presença de valores elevados de umidade dentro da câmara, induzindo uma porcentagem de conversão mais elevada. Neste sentido, Dheilly *et al.* (2002) afirmam que em ambientes com umidade elevada, níveis relativamente baixos de  $\text{CO}_2$  e temperaturas ( $\sim 10^\circ\text{C}$ ) favorecem a carbonatação.

Figura 1 – Evolução da carbonatação nos três ambientes



Fonte: Os autores

Em termos comparativos, para o processo de carbonatação em natural e em elevada concentração de  $\text{CO}_2$ , diferentes conclusões foram encontradas na literatura. Avaliando os dados das amostras armazenadas nas outras duas condições, valores similares para a reação máxima foram obtidos,  $R_{\text{max}} \approx 70\%$  aos 14 dias para a amostra armazenada na câmara de “elevado  $\text{CO}_2$ ”, e  $\sim 76\%$  na mesma idade para a amostra armazenada dentro do “padrão”. Percentuais comparáveis da reação total são encontrados na literatura para o processo de carbonatação natural (MONTES-HERNANDEZ, DAVAL *et al.* 2010; MONTES-HERNANDEZ, POMMEROL ET AL. 2010; MONTES-HERNANDEZ, CHIRIAC *et al.* 2012). Os resultados obtidos no presente estudo mostraram uma carbonatação mais rápida para a amostra na câmara com 4% de  $\text{CO}_2$ .

### 3 CONCLUSÕES

O presente artigo apresentou um programa experimental de caracterização das cinéticas de reação de carbonatação em argamassas de cal. Pequenos discos de argamassa foram sujeitos a 3 ambientes de condições distintas. Os provetes armazenados no ambiente úmido evidenciaram um atraso significativo no início das reações de carbonatação, em correspondência com a lentidão associada ao processo de secagem (e subsequente difusão de CO<sub>2</sub>). Os ambientes padrão e de elevada concentração em CO<sub>2</sub>, proporcionaram cinéticas semelhantes de evolução da carbonatação, mas com extensão muito mais completa da reação neste último ambiente.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao projeto de Extensão da Universidade Federal do Pará – PIBEX2018, pelo suporte financeiro.

## REFERÊNCIAS

CEN (2005). "CEN-EN-196-1-Methods of testing cement. Determination of strength." European Committee for Standardization.

Dheilly, R. M., J. Tudo, et al. **Influence of storage conditions on the carbonation of powdered Ca(OH)<sub>2</sub>**. Construction and Building Materials 16(3), 2002. p. 155-161.

Houst, Y. F. **The role of moisture in the carbonation of cementitious materials**. International Journal for Restoration of Buildings Monuments 2(1), 1996. p. 49–66.

Lawrence, R. M. H. **A Study of Carbonation in Non-Hydraulic Lime Mortars**. Department of Architecture and Civil Engineering. Bath, University of Bath. Doctor of Philosophy, 2006. 316 p.

Margalha, G., Veiga, R., Silva, A. S. and de Brito, J., (2011). "Traditional methods of mortar preparation: The hot lime mix method." *Cement and Concrete Composites*, 33 (8), 796-804.

Montes-Hernandez, G., R. Chiriac, et al. **Gas–solid carbonation of Ca(OH)<sub>2</sub> and CaO particles under non-isothermal and isothermal conditions by using a thermogravimetric analyzer: Implications for CO<sub>2</sub> capture**. International Journal of Greenhouse Gas Control 11, 2012. p. 172-180.

Montes-Hernandez, G., D. Daval, et al. **Growth of Nanosized Calcite through Gas–Solid Carbonation of Nanosized Portlandite under Anisobaric Conditions**. Crystal Growth & Design 10(11), 2010. p. 4823-4830.

Montes-Hernandez, G., A. Pommerol, et al. **In situ kinetic measurements of gas–solid carbonation of Ca(OH)<sub>2</sub> by using an infrared microscope coupled to a reaction cell**. Chemical Engineering Journal 161(1–2), 2010. p. 250-256.

Moropoulou, A., et al. (1996). "Hot lime technology imparting high strength to historic mortars." *Construction and Building Materials*, 10 (2), 151-159.

Oliveira, M. A., (2015). "A Multi-Physics Approach Applied to Masonry Structures with Non-Hydraulic Lime Mortars." Tese de Doutorado, Universidade do Minho.

OLIVEIRA, M. A. et al. **Study of the evolution of carbonation in aerial lime mortars**, V Fical - FICAL – FORUM IBÉRICO DA CAL. Lisbon: 10 p. 2016.

OLIVEIRA, M. A. et al. Experimental analysis of the carbonation and humidity diffusion processes in aerial lime mortar. **Construction and Building Materials**, v. 148, p. 38-48, 2017. ISSN 0950-0618.

Sanjuán, M. A., C. Andrade, et al. **Concrete carbonation tests in natural and accelerated conditions**. *Advances in Cement Research* 14(5), 2003. p. 171 –180.