

ESTUDO DA POROSIDADE DE ARGAMASSAS DE REVESTIMENTO POR MEIO DO ÍNDICE DE VAZIOS E MEV

HANAELLY GARCIA DO CARMO HILÁRIO¹, ANA PAULA DE OLIVEIRA², CLEITON RODRIGUES SIQUEIRA³, ANDRIELLI M. OLIVEIRA⁴, OSWALDO CASCUDO⁵

¹Ma. Engenheira Civil, doutoranda pelo PPG-GECON - UFG, Goiânia-GO, hanaellygcarmo@hotmail.com;

^{2,3}Me. Engenheiro Civil, PPG-GECON - UFG, Goiânia-GO, oliveira.ape@gmail.com, engcleitonsiqueira@gmail.com;

⁴Prof^a Dr^a, Escola de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal de Goiás/UFG, andriellimorais@ufg.br;

⁵Prof. Dr, Escola de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal de Goiás/UFG, ocascudo@gmail.com.

Apresentado no
Congresso Técnico Científico da Engenharia e da Agronomia – CONTECC
15 a 17 de setembro de 2022

RESUMO: O presente trabalho estuda a porosidade de argamassas de revestimento, pelo índice de vazios (NBR 9778: 2005) e pelo uso de imagens de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e *software* MATLAB. Para tanto, foram produzidas 3 argamassas, sendo uma apenas com cimento e areia (traço 1:3); outra com cimento, cal e areia (1:2:9) e, por fim, uma com cimento, filito e areia (1:2:9). Todas as argamassas tiveram a mesma relação água/ligante (0,8). Foi avaliada a resistência à compressão na idade de 28 dias. Como resultado, foi verificada uma maior porosidade e índice de vazios para argamassas com cal e filito, resultando conseqüentemente, em menor resistência à compressão, quando compara a argamassa de cimento. A técnica obtida por MEV apresentou resultados de porosidade inferiores aos de índice de vazios, mas estes resultados ainda não correlacionáveis.

PALAVRAS-CHAVE: Argamassas, Porosidade, MEV, Matlab.

Study of the porosity of coating mortars through void index and SEM

ABSTRACT: The present work studies the porosity of coating mortars, by the void index (NBR 9778: 2005) and using Scanning Electron Microscopy (SEM) images and MATLAB software. For that, 3 mortars were produced, one with just cement and sand (trace 1:3); another with cement, lime and sand (1:2:9) and, finally, one made with cement, phyllite and sand (1:2:9). All mortars had the same water/binder ratio (0.8). Compressive strength was evaluated at 28 days. As a result, a higher porosity and void index were observed for mortars with lime and phyllite, resulting in lower compressive strength, when compared to cement mortar only. The technique obtained by SEM presented results of porosity lower than the void index, but these results are not yet correlated.

KEYWORDS: Mortar, Porosity, Matlab, Lime, Phyllite.

INTRODUÇÃO

No Brasil é comum a utilização da cal hidratada como aglomerante e plastificante de argamassas de revestimento. Entretanto, nos últimos tempos, materiais alternativos à cal estão sendo utilizados para redução de custos, sendo um deles o filito.

Apesar de apresentarem a mesma finalidade, existem diferenças significativas na composição desses materiais (SOUZA, 2009; MELO 2012; ROMANO, 2014). Essas diferenças irão influenciar diretamente nas propriedades das argamassas, tanto no estado fresco (reologia e trabalhabilidade), quanto no estado endurecido (resistência de aderência e durabilidade/porosidade). O presente trabalho estuda a porosidade de argamassas de revestimento, pelo índice de vazios (NBR 9778: 2005) e pelo uso de imagens de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e *software* MATLAB. Foram empregados diferentes métodos para análise da porosidade, como a obtenção da porosidade, obtidas por MEV, por meio de elétrons retroespalhados e quantificadas pelo *software* Matlab. Segundo Edwin *et al.* (2019), a técnica tem sido amplamente utilizada no meio acadêmico desde que

introduzida por Scrivener e Pratt, ainda na década de 80. Além disso, também foi realizada a verificação do índice de vazios (ABNT NBR 9778: 2005) e a análise da resistência à compressão.

MATERIAL E MÉTODOS

No presente trabalho foram utilizados: cimento CP II F – 32, cal hidratada CH-III, filito e areia natural. A relação água/ligante foi mantida fixa para todas as misturas e igual a 0,8. Detalhes dos traços utilizados estão expostos na Tabela 1.

Tabela 1. Traços utilizados no estudo e ensaios no estado fresco

| Mistura | Código | Traço | Relação a/finos | Cimento (kg/m ³) | Cal (kg/m ³) | Filito (kg/m ³) | Areia (kg/m ³) | Consistência (cm) |
|---------|--------|-------|-----------------|------------------------------|--------------------------|-----------------------------|----------------------------|-------------------|
| 1 | Cim | 1:3 | 0,8 | 400 | 0 | 0 | 1110 | 34,2 |
| 2 | Cal | 1:2:9 | 0,8 | 133 | 161 | 0 | 1110 | 28,9 |
| 3 | Fil | 1:2:9 | 0,8 | 133 | 0 | 215 | 1110 | 29,5 |

Para a caracterização do material no estado fresco, foi determinado o índice de consistência da argamassa (ABNT NBR 13276:2016). Para caracterização no estado endurecido, após 28 dias de cura por imersão, os corpos de prova de argamassa (CPs), cilíndricos 10 cm x 5 cm, foram ensaiados quanto a resistência à compressão, conforme NBR 7215 (ABNT, 2019).

A porosidade foi investigada por MEV, associada ao *software* Matlab. As amostras foram retiradas dos CPs cilíndricos e tiveram sua hidratação interrompida por imersão em álcool isopropílico e secagem em estufa, na idade de 28 dias. Em um processo subsequente, as amostras foram impregnadas com resina epóxi, polidas com carbetto de silício (#500 e #1000) e pasta diamantada (#9µm, #3µm e #1µm) por aproximadamente 5 minutos em cada especificação, limpas com álcool isopropílico, recobertas com carbono e levadas ao Microscópio Eletrônico de Varredura (Jeol, JSM – 6610), a uma voltagem de aceleração de 7 kV. Foram realizadas 12 imagens para cada amostra com ampliações de x40, x400 e x1000.

Uma vez obtidas as imagens de MEV, elas foram levadas ao Matlab e submetidas ao método proposto por Edwin *et al.* (2019). Assim, por meio de programações matemáticas, os diferentes tons de cinza (resultantes dos espaços vazios) foram identificados pela varredura de cada pixel da imagem, os tons podem variar de 0 a 255. Uma vez que elementos com menor densidade apresentam-se em tons mais escuros, os poros são vistos inicialmente com tons pretos. A partir disso, foram identificadas as partes de interesse, nas quais os vazios e os sólidos se distinguem, obtendo-se, assim, uma imagem binária para o cálculo de porosidade total das argamassas.

O método usado para quantificar a porosidade de argamassas é baseado em Wong, Head e Buenfeld (2006). Os autores ressaltam que por conta da diferença de tonalidade e brilho, cada imagem tem um limite de poros diferente, ou seja, para cada imagem deve-se calcular o tom de cinza que divide os elementos hidratados e os poros da argamassa. Isso pode ser feito por meio do gráfico da curva cumulativa expressa em tons de cinza pela área que eles ocupam em porcentagem. Posteriormente, os pontos de inflexão da curva acumulada são descobertos e uma reta tangente a esses pontos é traçada. O ponto de intersecção das duas retas representa o tom de cinza limite para os poros da amostra (Ponto A). Esse resultado é minorado em 10%, multiplicando o ponto de intersecção por 0,9 (Ponto B). A porosidade foi validada e comparada com análises de índice de vazios, seguindo as recomendações da NBR 9778 (ABNT, 2005).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

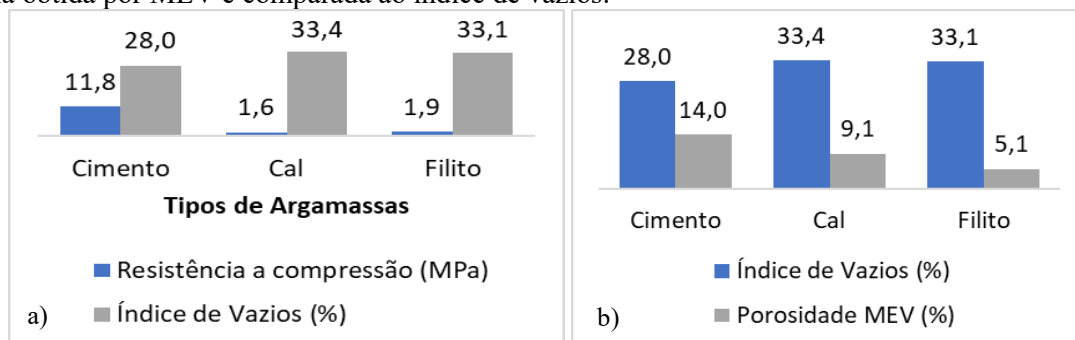
No que se refere ao estado fresco, para o ensaio de consistência foi percebido que a inserção de finos diminuiu a trabalhabilidade das misturas de cal e filito em 15% e 13%, respectivamente, em comparação a argamassa de cimento, a qual apresentou-se mais fluída.

No que se refere ao estado endurecido, a Figura 1a apresenta os resultados de resistência à compressão e o índice de vazios para todas as argamassas estudadas. Como já esperado, a argamassa contendo apenas cimento, devido a sua natureza e quantidade de aglomerante, apresentou os maiores valores de resistência à compressão, sendo respectivamente 86% e 84% maiores do que as misturas com cal e filito. A Figura 1a ainda mostra que a argamassa binária apresentou o menor índice de vazios. Os resultados obtidos corroboram com aqueles verificados no ensaio de resistência à

compressão. A argamassa composta apenas por cimento gerou uma matriz mais compacta, reduzindo assim a porosidade total, aumentando a resistência à compressão e reduzindo em até 19% o índice de vazios, quando comparado as demais argamassas. As argamassas contendo cal e filito apresentaram valores muito próximos nos ensaios realizados, expressando uma matriz mais porosa. Isto refletiu também no baixo desempenho à compressão com os menores valores obtidos.

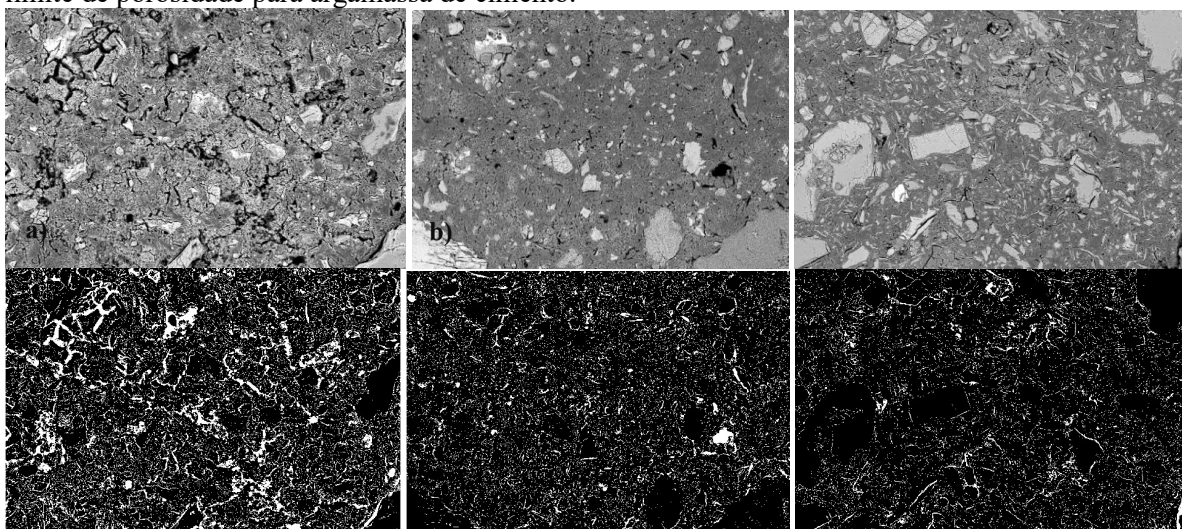
Com relação ao cálculo de porosidade por MEV, em geral, as argamassas exibiram resultados inferiores aos encontrados no índice de vazios (Figura 1b). As médias de porosidade encontradas neste estudo também se diferem dos valores verificadas por Edwin *et al.* (2019) e Wong, Head e Buenfeld (2006), para ampliações próximas. As argamassas com cal e filito apresentaram uma porosidade 35% e 64% menor do que a argamassa cimento, respectivamente. O fato pode ser explicado pela limitação da técnica de MEV quanto a resolução e a captação do *range* poroso para materiais cimentícios.

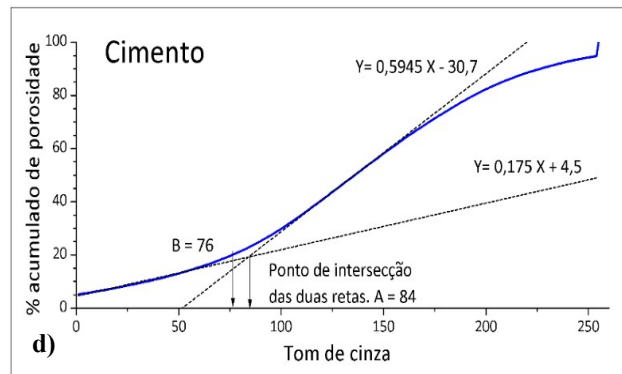
Figura 1. a) Resultados de Resistência a compressão aos 28 dias e índice de vazios; b) Porosidade média obtida por MEV e comparada ao índice de vazios.



A análise da porosidade por meio de MEV seguiu as orientações da metodologia criada por Wong, Head e Buenfeld (2006) e adaptada por Edwin *et al.* (2019). Por isso, as imagens selecionadas para cálculo da porosidade foram ampliadas em x400. Elas foram retiradas em locais diferentes da amostra e, dessa forma, o resultado da porosidade foi obtido pela média das porosidades encontradas em cada imagem. A Figura 2 apresenta as imagens de MEV, a binarização da imagem e o cálculo do tom limite de poros para cada imagem. Após a binarização das imagens de MEV, o branco é destacado como poros e a parte escura, como partículas sólidas.

Figura 2. a) Argamassa Cimento - 20% de porosidade; b) Argamassa Cal - 10,8% de porosidade; c) Argamassa Filito - 8,28% de porosidade - Imagens de MEV por elétrons retroespalhados (acima); imagens binárias para o cálculo da porosidade por Matlab (abaixo); d) gráfico explicativo de tom limite de porosidade para argamassa de cimento.



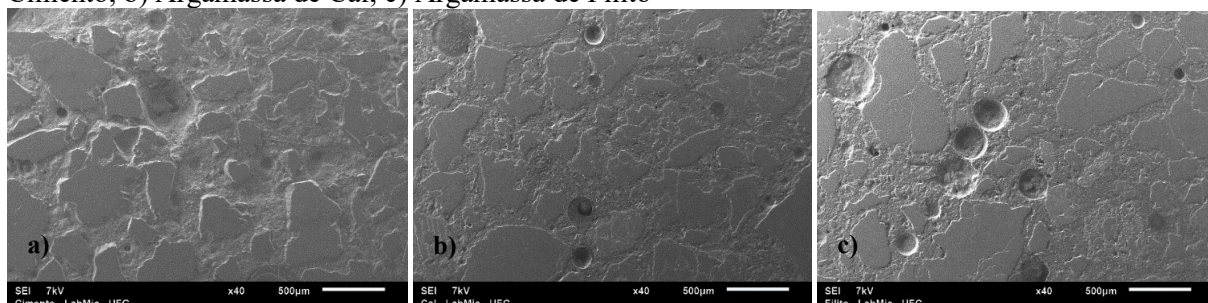


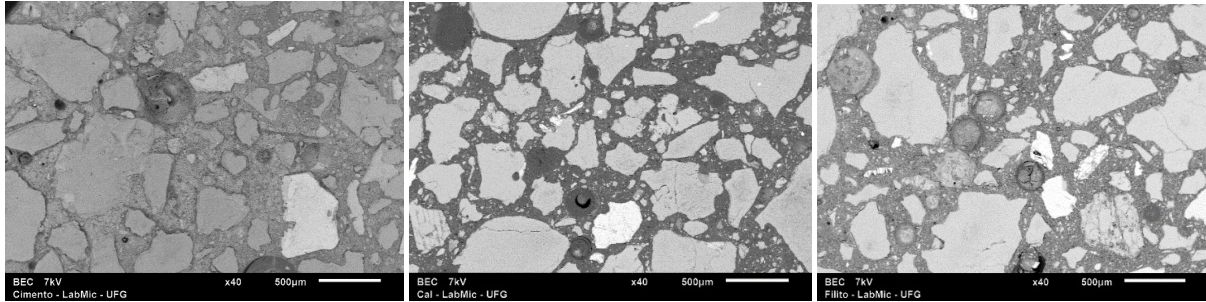
É necessário ressaltar possíveis causas para a divergência de valores encontradas, tanto entre os métodos deste estudo, quanto para os resultados obtidos pelos autores originais. Inicialmente, pode-se afirmar que, apesar do ensaio de índice de vazios não mostrar informações importantes como distribuição de poros e *layout* deles, ele consegue captar um *range* poroso maior que a técnica de MEV que sempre estará limitada a resolução da imagem. Além disso, por meio de imagens obtidas em menores ampliações (x40), foi possível identificar grande formação de vazios de ar incorporados ao material, principalmente nas argamassas com cal e filito. A Figura 3 mostra tais vazios por meio de imagens de elétrons secundários (SEI). No entanto, quando as imagens de SEI são contrastadas com as imagens de elétrons retroespalhados, tais vazios não são identificados por tons escuros, não sendo caracterizados como poros. Além disso, estes não são identificados por ampliações de x400, conforme recomendado pelos autores de origem. Dessa forma, quando o método desconsidera esse tipo de vazio, a porosidade é diminuída drasticamente.

Ainda, enquanto os demais poros são irregulares, os vazios de ar aprisionados ou adicionados geralmente são esféricos e consideravelmente maiores que os vazios capilares, o que os torna capazes de agir de forma adversa, afetando a resistência à compressão (MEHTA; MONTEIRO, 2006). Por isso, a porosidade final das argamassas, por meio de análises de MEV, apresentou-se reduzida e incongruente com os demais resultados verificados. Ademais, os ensaios laboratoriais que mensuram porosidade, associado ao que foi verificado no ensaio de resistência à compressão evidenciam que as misturas cal e filito apresentaram maior porosidade que culminou na menor resistência verificada. Visto isso, pode-se afirmar que o cálculo da porosidade das argamassas pelo método de análise de imagens não foi conclusivo, devido a incorporação de ar à mistura e a ampliação de análise (x400).

São necessárias repetições de imagens em outras escalas de aproximação para fazer a tentativa de se obter valores mais próximos de porosidade entre os métodos estudados e melhores correlações entre eles.

Figura 3. Vazios de ar incorporado às argamassas por MEV (SEI) e MEV (BEC) - a) Argamassa de Cimento; b) Argamassa de Cal; c) Argamassa de Filito





CONCLUSÃO

É possível concluir, com o presente estudo, que as argamassas contendo cal e filito apresentaram maior porosidade, atestado pelo índice de vazios, bem como menor resistência à compressão, em comparação a mistura contendo apenas cimento. O maior consumo de cimento adotado para essa mistura favoreceu a compactação da matriz cimentícia, por meio da síntese de C-S-H, o que resultou na menor porosidade e maior resistência à compressão.

O cálculo da porosidade pelo MEV, com o auxílio do Matlab, não foi conclusivo, tanto pela incorporação de ar à mistura, quanto pela ampliação escolhida para análise (x400). Tal ampliação não foi capaz de captar os vazios de ar incorporados as argamassas, mas se mostraram presentes em uma ampliação 10 vezes menor (x40).

Sendo assim, novas análises serão realizadas com outros materiais (novas argamassas e concretos), variando-se apenas a quantidade de água, conforme já executado pela bibliografia consultada. Será considerado também uma maior variação de ampliações para estudos futuros. Logo, estudos complementares serão necessários para confirmar a possibilidade de melhor correlação entre a porosidade pelas imagens de MEV e MATLAB e de índice de vazios.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão da bolsa de estudos, e a Furnas Centrais Elétricas pelo suporte financeiro ao grupo de durabilidade do PPG GECON.

REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 13276: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação do índice de consistência. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7215: Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro, 2019.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 9778: Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro, 2005.
- EDWIN, R. S.; MUSHTHOFA, M.; GRUYAERT, E.; DE BELIE, N. Quantitative analysis on porosity of reactive powder concrete based on automated analysis of back-scattered-electron images. *Cement and Concrete Composites*, v. 96, p. 1–10, 2019.
- MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. *Concrete: Microstructure, Properties and Materials*. 3ed. USA: McGraw-Hill Companies, 2006.
- MELO, L. G. A.; THAUMATURGO, C. Filito: Um material estratégico para fabricação de novos cimentos. Seção de Engenharia elétrica – Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2012.
- ROMANO, R. C. O.; SEABRA, M. A.; JOHN, V. M.; PILEGGI, R. G. Caracterização reológica de suspensões cimentícias mistas com cales ou filitos. *Ambiente Construído*, v. 14, n. 1, p. 75-84, jan./mar. 2014.
- SOUZA, R. B.; LIMA, F. S. S Influência da cal e do filito na cinética da hidratação do cimento. In: VIII Simpósio Brasileiro de Tecnologia das Argamassas, 2009, Curitiba. Anais [...]. São Paulo: USP, 2009, p. 1-14.
- WONG, H. S.; HEAD, M. K.; BUENFELD, N. R. Pore segmentation of cement-based materials from backscattered electron images. *Cement and Concrete Research*, v. 36, p. 1083 – 1090, 2006.