ESTUDO DO IMPACTO DA POROSIDADE NA RESISTÊNCIA MECÂNICA EM CORPOS DE PROVA DE ARGAMASSAS ESTABILIZADAS

Pedro Lucas da Costa Duarte Cerqueira, Lylian Gabriele Carneiro Oliveira, Thiago de Oliveira Ribeiro, Fernanda Nepomuceno Costa.

Universidade Federal do Recôncavo da Bahia (UFRB) / Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas (CETEC), Rua Rui Barbosa, S/N, campus da UFRB - 44380-000 - Cruz das Almas-BA, Brasil, pedrolucascerqueira@hotmail.com, lyliangabriele@aluno.ufrb.edu.br, thiagoribeiro@aluno.ufrb.edu.br, fernandacosta@ufrb.edu.br.

Resumo

Este estudo comparou dois traços de argamassa estabilizada com relação água/materiais secos distintas, um com 1,20 de a/c (dosado para 72 horas de manutenção no estado fresco) e outro com 1,00 de a/c (produzido para resistir a 36 horas no estado fresco), para avaliar a relação entre porosidade e resistência mecânica. A metodologia empregada na pesquisa envolveu a caracterização dos materiais, a formulação dos traços e a produção das argamassas, seguidas da realização de ensaios de porosidade e de determinação da resistência à tração na flexão e à compressão em corpos de prova prismáticos. Os resultados indicaram que o traço com menos água incorporada possui menor porosidade aparente, e sob consequência disso, apresentou melhores resistências à tração e à compressão em todos os tempos de cura testados, evidenciando que um controle rigoroso da umidade é essencial para otimizar as propriedades mecânicas das argamassas.

Palavras-chave: Argamassa estabilizada. Porosidade. Resistência mecânica. Controle da umidade.
Área do Conhecimento: Engenharias; Engenharia Civil.

Introdução

As argamassas estabilizadas são amplamente utilizadas em diversas etapas construtivas, destacando-se pela sua capacidade de manutenção das propriedades no estado fresco por períodos prolongados. Isso permite uma maior flexibilidade na aplicação e uma redução significativa nos desperdícios associados à perda de material (Schackow et al., 2019). No entanto, a eficácia dessa abordagem depende de um controle rigoroso das características da argamassa, como a porosidade e a resistência mecânica, que são diretamente influenciadas pelo teor de umidade e pelo tempo de manutenção no estado fresco (Scharnberg et al., 2019).

A relação entre porosidade e resistência mecânica é complexa, pois um aumento na porosidade pode comprometer a resistência da argamassa no estado endurecido, enquanto um controle adequado do teor de umidade pode melhorar essas propriedades (Edris et al., 2023). Dentre as variáveis que impactam diretamente o desempenho das argamassas estabilizadas, o teor de umidade e o tempo de manutenção no estado fresco se destacam como fatores críticos já que um traço mais úmido pode facilitar a aplicação e prolongar a trabalhabilidade, mas também pode resultar em maior porosidade, comprometendo a resistência mecânica (Santana e Pereira, 2020).

Por outro lado, um traço menos úmido, embora apresente menor porosidade, pode limitar o tempo disponível para a aplicação, exigindo uma maior eficiência no processo construtivo (Schackow et al., 2019). Assim, a escolha entre diferentes traços de argamassa estabilizada deve ser feita com base em uma análise cuidadosa que considere não apenas as características técnicas do material, mas também a eficiência operacional e a minimização de desperdícios. Desse modo, uma análise comparativa entre diferentes traços de argamassa, com distintos teores de umidade, é essencial para entender como essas divergências afetam a resistência mecânica.

Diante disso, este artigo tem como foco a avaliação comparativa entre dois traços de argamassa estabilizada, um mais úmido, produzido para permanecer no estado fresco por até 72 horas, e outro traço menos úmido, formulado para permanecer no estado fresco por até 36 horas. O objetivo é associar as porosidades dos corpos de prova moldados com essas argamassas à sua resistência à tração e à compressão, fornecendo *insights* que podem contribuir para maximizar a eficiência e a qualidade nas construções que adotam essa tecnologia.

Metodologia

A metodologia empregada na elaboração desse trabalho é de natureza experimental, se dividindo em: Seleção dos materiais, ensaios de caracterização dos materiais, formulação das argamassas através de referências de estudos anteriores e adaptações por meio de testes no laboratório, produção da argamassa e ensaios para avaliação da porosidade e da resistência mecânica.

- **Seleção e caracterização dos materiais:**

Para a produção das argamassas, empregou-se cimento Portland do tipo CP II – F 32, aditivo incorporador de ar e aditivo estabilizador de hidratação. A água utilizada passou por processo de destilação no laboratório com o objetivo de eliminar impurezas e evitar reações indesejadas que comprometam os comportamentos dos materiais contidos nas argamassas.

Para esses materiais, foram coletadas as massas específicas, do cimento através dos procedimentos da NBR NM 23:2001, dos aditivos incorporador de ar e controlador de hidratação através dos manuais de instruções do Centripor 411 e Centripor Retard 225, respectivamente, da MC-Bauchemie; e, por fim, da água coletando a massa de um litro de água destilada e depois dividindo a massa obtida pelo volume pesado.

O agregado utilizado foi a areia natural (AN) proveniente de uma jazida localizada na cidade de Alagoinhas – BA e foi caracterizada experimentalmente conforme os procedimentos descritos nas seguintes normas: NBR NM 45:2006 para determinação da massa unitária, NBR NM 52:2009 para a determinação da massa específica, NBR NM 248:2001 para a determinação da composição granulométrica e a NBR NM 16973:2021 para a determinação do teor de material pulverulento.

O tratamento desse agregado incluiu secagem em estufa a 100±5 °C por 24 horas e peneiramento para a remoção de materiais orgânicos vegetais incorporados, no qual passou por uma peneira de abertura de 2,00 mm para eliminar quaisquer grãos de diâmetro superior ao desejado.

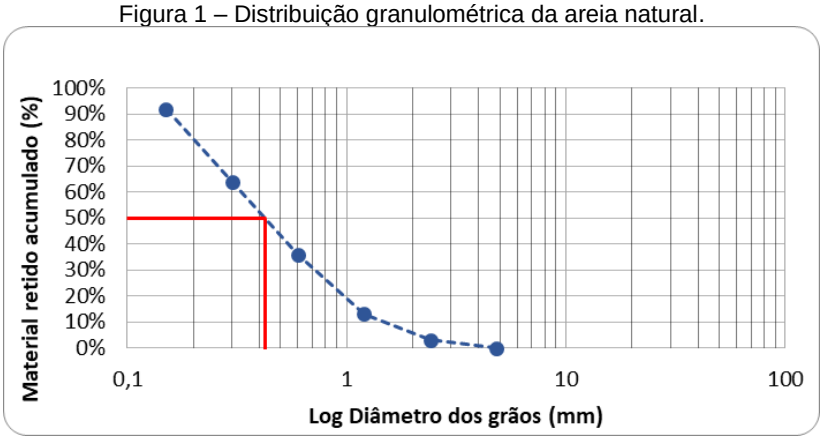
Os resultados da caracterização dos materiais utilizados na produção das argamassas estabilizadas estão apresentados na Tabela 1 e na Figura 1 a curva granulométrica do agregado utilizado.

Tabela 1 – Caracterização dos materiais empregados para produzir as argamassas estabilizadas.

Material	Massa específica (g/cm³)	Massa unitária (g/cm³)	Diâmetro médio D50 (mm)	Módulo de finura	Teor de material pulverulento (%)
Cimento CP II – F 32	3,15	-	-	-	-
Areia natural	2,62	1,59	0,43	2,08	2,19 ± 0,15
Aditivo Incorporador de ar	1,00	-	-	-	-
Aditivo controlador de hidratação	1,17	-	-	-	-
Água	1,00	-	-	-	-

Fonte: os autores.

Figura 1 – Distribuição granulométrica da areia natural.



Fonte: os autores.

- **Formulação, produção e estocagem das argamassas estabilizadas:**

Os traços testados para a argamassa estabilizada foram baseados em um estudo realizado por Guindani (2018). Nessa avaliação, obteve-se aproximadamente o traço 1:6:0,9 (cimento, areia e água/cimento), sendo que os percentuais dos aditivos foram testados e adaptados, bem como a relação água/cimento para corresponder às características do agregado e aglomerante disponível, bem como às condições climáticas do município de Cruz das Almas-BA e tempo de estabilização desejado.

O resultado da dosagem das argamassas está apresentado na Tabela 2. Observa-se que para a obtenção da estabilização da argamassa de 72 horas foi necessário utilizar um maior teor de aditivo incorporador de ar (AIA) e de aditivo controlador de hidratação (ACH), bem como uma maior quantidade de água na mistura, em relação ao tempo de estabilização de 36 horas. Assim, o estudo dos traços resultou em uma formulação com mais água e consequentemente mais umidade para 72h de estabilização e uma formulação com menos água, portanto menos umidade para 36h de estabilização.

Tabela 2 – Traços encontrados para diferentes tempos de estabilização da argamassa estabilizada.

Denominação	Tempo de estabilização	Cimento (c)	Areia natural (AN)	AIA	ACH	água / cimento
T1-36h	36 horas	1	6	0,25%	0,45%	1,0
T2-72h	72 horas	1	6	0,30%	0,75%	1,2

Fonte: os autores.

A mistura foi realizada segundo em um misturador de argamassa (argamassadeira eletromecânica) após a obtenção do consumo de materiais para a substituição parcial (percentual de AB sob a massa de AN) para os traços indicados na Tabela 2.

A produção das argamassas aconteceu da seguinte forma (Guindani, 2018):

1. Acrescentar 90% da água;
2. Acrescentar o cimento e misturar por 30 s em velocidade baixa;
3. Acrescentar a areia e misturar por 30 s em velocidade baixa;
4. Pausa de 1 min para remover o material aderido nas paredes do recipiente;
5. Acrescentar o AIA junto com 5% da água e misturar por 30 s em velocidade baixa;
6. Acrescentar o ACH junto com 5% da água e misturar por 1 min em velocidade alta;
7. Pausa de 30 s para homogeneização manual;
8. Finalizar com 30 s de mistura em velocidade alta.

Após a mistura, a argamassa foi armazenada sem lâmina de água em um recipiente plástico fechado até completar o seu tempo de estabilização, quando poderá ser moldada.

- **Moldagem e cura dos corpos de prova:**

Os corpos de prova foram moldados em fôrmas prismáticas de acordo com os procedimentos descritos na NBR 13279:2005, após a pega, desmoldados e submetidos à cura até a idade de ruptura.

- **Determinação da porosidade:**

Com um paquímetro, foram coletadas duas medidas de cada dimensão dos três corpos de prova para cada traço, após 28 dias de cura. A massa saturada (m_{sat}) foi obtida em balança de precisão de 0,01g, e, em seguida, os corpos de prova foram secos em estufa a 105°C até massa constante, registrando-se a massa seca (m_s). Com esses dados, calculou-se a porosidade média aparente (ε) de cada corpo de prova pela relação entre o volume de poros preenchidos com água (diferença entre m_{sat} e m_s) e o volume total (V), conforme a Equação 1.

$$\varepsilon = \frac{\sum_{i=0}^{n} \frac{(m_{sat} - m_s)}{V} \times 100}{n} \qquad \text{(Equação 1)}$$

- **Determinação das resistências à tração na flexão e à compressão:**

A resistência à tração na flexão e à compressão foram obtidas por meio dos procedimentos descritos na NBR 13279:2005. Nela é descrito o equipamento, a preparação dos corpos de prova após a ruptura na flexão, a velocidade de aplicação da carga e a interpretação dos resultados.

Resultados e Discussão

- **Avaliação da porosidade:**

Os resultados da porosidade aparente dos corpos de prova prismáticos foram obtidos para os dois traços de argamassa estabilizada estudados: um menos úmido (traço de 36 horas) e outro mais úmido (traço de 72 horas). A Tabela 3 apresenta as médias das medidas de massa saturada, massa seca, volume total e porosidade aparente para cada traço, bem como seus respectivos desvios padrão.

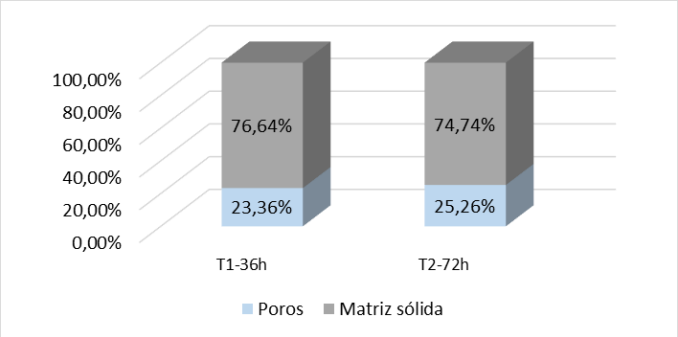
Tabela 3 – Média das medidas de massa e volume dos corpos de prova avaliados da porosidade aparente.

Traço	Massa saturada (g)	Massa seca (g)	Volume total (cm³)	Porosidade aparente (%)
T1-36h	483,26 ± 3,02	422,38 ± 2,34	260,60 ± 0,88	23,36 ± 0,43
T2-72h	474,57 ± 0,74	411,79 ± 3,05	255,42 ± 3,57	25,26 ± 0,26

Fonte: os autores.

Para ilustrar as diferenças entre os traços, a Figura 2 apresenta a porosidade aparente média para ambos os traços, comparando-a com a matriz sólida de argamassa. Observa-se que o traço mais úmido apresenta uma porosidade aparente superior ao traço menos úmido, o que pode ser atribuído à maior quantidade de água e aditivo incorporador de ar presente na mistura inicial, que, após a evaporação da água na secagem e endurecimento das argamassas, resulta em um maior volume de vazios.

Figura 2 – Porosidade aparente média para os traços de argamassas estabilizadas avaliados.



Fonte: os autores.

Os resultados sugerem que o traço mais úmido, preparado para permanecer 72 horas no estado fresco, desenvolve uma estrutura mais porosa após a cura. Estudos indicam que a umidade e a presença de aditivos têm um impacto significativo nas propriedades físicas das argamassas, incluindo a porosidade (Schackow et al., 2019). A presença de aditivos, como incorporadores de ar, pode aumentar a porosidade, mas também melhorar a trabalhabilidade e a retenção de água, o que é benéfico para a aplicação em campo (Antoniazzi et al., 2020).

Os resultados obtidos corroboram a ideia de que a umidade e a composição da mistura têm um papel fundamental na formação da estrutura porosa das argamassas. A pesquisa de Souza et al. (2023) destaca que uma mistura adequada dos materiais constituintes pode resultar em um menor volume e dimensão de poros, o que é ideal para melhorar as propriedades mecânicas das argamassas.

- **Avaliação da resistência mecânica:**

A seguir, visualiza-se os resultados da avaliação de desempenho mecânico de tração na flexão (Figura 3) e de resistência à compressão (Figura 4) dos corpos de prova produzidos para os dois traços testados nos tempos de cura de 7, 14 e 28 dias. Por meio dela é possível comparar os ganhos de resistência no decorrer do tempo de cura.

Os resultados mostram que os corpos de prova do traço menos úmido, com menor porosidade aparente, apresentaram melhores resistências à tração, como observado na Figura 3, e também à compressão, segundo a Figura 4, para todos os tempos de cura testados. A maior densidade e o menor volume de vazios contribuem para uma estrutura interna mais compacta e resistente, o que se reflete nos valores superiores de resistência mecânica, tanto para tração na flexão quanto para compressão, observadas no Traço T1-36h (Ramos et al., 2021).

Figura 3 – Resistências à tração na flexão para as argamassas estabilizadas de 36 e de 72 horas.

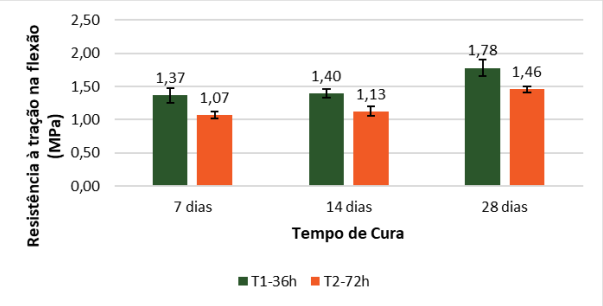
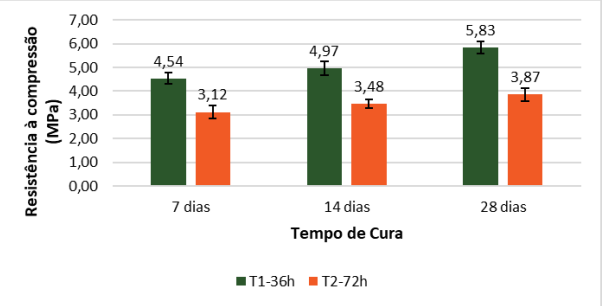


Figura 4 – Resistências à compressão para as argamassas estabilizadas de 36 e de 72 horas.



Fonte: os autores.

Além disso, a análise comparativa dos dois traços evidencia que o traço mais úmido (T2-72h), embora demonstre um aumento na resistência com o tempo, ainda permanece significativamente inferior ao traço menos úmido (T1-36h) em termos de desempenho à compressão e tração na flexão. Isso reforça que a relação entre porosidade e resistência mecânica é inversamente proporcional; ou seja, à medida que a porosidade aumenta, a resistência tende a diminuir (Ramos et al., 2021).

Diante da avaliação da influência da porosidade na resistência mecânica das argamassas, conclui-se que um controle rigoroso da quantidade de água na mistura é fundamental para melhorar suas propriedades mecânicas. Uma análise de Corso et al. (2020) reforça a ideia de que a resistência à atuação de esforços em corpos de prova de argamassas pode ser otimizada com a adição de materiais que reduzam a porosidade, de modo a preencher os poros e diminuir o volume de vazios.

A correlação direta observada entre a menor porosidade aparente e as melhores resistências mecânicas sugere que a modulação da umidade pode ser uma estratégia eficaz para o desenvolvimento de argamassas estabilizadas com propriedades mecânicas superiores. Esses resultados indicam que intervenções direcionadas para o controle da porosidade, como a modificação do traço em relação à quantidade de água e a incorporação de aditivos, podem ser estratégias eficazes para aprimorar o desempenho mecânico das argamassas.

Conclusão

Com base nos resultados obtidos neste estudo, pode-se concluir que:

- O traço menos úmido demonstrou uma menor porosidade e, consequentemente, maiores resistências à tração e compressão, confirmando a relação inversa entre porosidade e resistência mecânica.
- Embora o traço mais úmido mostre um aumento gradual de resistência com o tempo, ele permanece inferior em desempenho em relação ao traço menos úmido.
- A redução do teor de umidade, aliada ao controle adequado da quantidade de aditivos, pode ser uma estratégia eficaz para o desenvolvimento de argamassas com melhores características estruturais e durabilidade.
- Intervenções que visem reduzir a porosidade, como ajustes na composição do traço e a utilização de aditivos específicos, podem ser fundamentais para atender às exigências de resistência mecânica e desempenho na construção civil.

Referências

ANTONIAZZI, J. P.; MOHAMAD, G.; CASALI, J. M.; SCHMIDT, R. P. B. **Incorporação de ar em argamassas estabilizadas: influência dos aditivos, agregados e tempo de mistura.** Ambiente Construído, Porto Alegre, v. 20, n. 3, p. 285-304, jul./set. 2020. ISSN 1678-8621.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR NM 23: **Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação de massa específica.** Rio de Janeiro, 2001.

_____. NBR NM 45: **Agregados – Determinação da massa unitária e do volume de vazios.** Rio de Janeiro, 2006.

_____. NBR NM 52: **Agregado miúdo – Determinação da massa específica e massa específica aparente.** Rio de Janeiro, 2009.

_____. NBR NM 248: **Agregados – Determinação da composição granulométrica.** Rio de Janeiro, 2001.

_____. NBR 13279: **Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão.** Rio de Janeiro, 2005.

_____. NBR 16973: **Agregados – Determinação do material fino que passa pela peneira de 75 µm por lavagem.** Rio de Janeiro, 2021.

CORSO, M.; BERTO, L. K.; ALBUQUERQUE, A. C. D. de; OLIVEIRA, J. H. de; FAVARO, S. L.; REZENDE, L. C. S. H. **Incorporação de óxido de grafeno em argamassa de revestimento: uma visão sustentável.** Ambiente Construído, Porto Alegre, v. 20, n. 1, p. 297-312, jan./mar. 2020. ISSN 1678-8621.

EDRIS, W.; HAMZA A., M.; MAHMOUD A. **Evolution of durability and mechanical behaviour of mud mortar stabilized with oil shale ash, lime, and cement.** Civil Engineering Journal, 9(9), 2023. ISSN 2175-2192.

GUINDANI, E. N. **Argamassa estabilizada para revestimento: Avaliação da influência da adição de finos nas propriedades do estado fresco e endurecido.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, 2018.

RAMOS, M. O.; PINHEIRO, I. G.; SOUZA JUNIOR, L. G. **Influência da porosidade na condutividade térmica, resistência mecânica e coeficiente de permeabilidade do concreto permeável.** Revista Ibero Americana de Ciências Ambientais, v.12, n.5, p.515-528, 2021, ISSN 2179-6858.

SANTANA, T. da S.; PEREIRA, C. H. de A. F. **Avaliação da influência da utilização de agregado miúdo reciclado em argamassas estabilizadas.** Ambiente Construído, Porto Alegre, v. 20, n. 3, p. 305-318, jul./set. 2020. ISSN 1678-8621.

SCHACKOW, A.; FERRARI, A. K.; EFFTING, C.; ALVES, V. O.; GOMES, I. R. **Stabilized mortar with air incorporator agent and plasticizer set retarder: performance measurement.** Revista IBRACON de Estruturas e Materiais, 2019. ISSN 1248-1259.

SCHARNBERG, A.; PREIBBNOW, A.; ARCARO, S.; SILVA, R.; SANTOS, P.; BASEGIO, T.; RODRIGUEZ, A. **Avaliação da adição de resíduos de vidro sodo-cálcico e erva-mate em matriz cerâmica**. Revista SciELO Brasil, 2019. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/0366-69132019653732466>.

SOUZA, A. H. F. de; GONÇALVES, N. A. A.; MONTEIRO, V. I.; SANTOS, C. Q.; PAES, I. N. L. **Avaliação da absorção capilar de água de diferentes argamassas e sua relação com a microestrutura.** In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DAS ARGAMASSAS, João Pessoa – PB, 2023.

Agradecimentos

Ao grupo de pesquisa em Valorização de Resíduos na Construção Civil da UFRB (Valora Civil) pelas contribuições no desenvolvimento da pesquisa, ao CNPq e PIBIC pelo amparo e fomento nas pesquisas e às empresas Massa Fort Concreto e MC-Bauchemie pela doação dos materiais.