

ANÁLISE DO DESEMPENHO MECÂNICO DE ARGAMASSAS COM NANOTUBOS DE CARBONO

Jéssyca Laryssa Galvão Duarte¹ (IC), Carlos Augusto de Souza Oliveira (PQ)¹

¹Universidade Federal de Itajubá - campus Itabira.

Palavras-chave: Aderência. argamassa. nanotubos de carbono. resistência à compressão.

Introdução

A nanotecnologia tem desempenhado um papel fundamental na inovação de materiais, especialmente na criação de materiais inteligentes e altamente eficientes. Um exemplo notável desse avanço são os nanotubos de carbono (NTCs), descobertos em 1991 pelo pesquisador japonês Sumio Iijima. Devido à sua estrutura tubular em escala nanométrica, os NTCs oferecem propriedades mecânicas, eletrônicas e térmicas excepcionais. Essas características tornam esses materiais promissores para uma ampla gama de aplicações, incluindo a construção civil, onde podem ser utilizados como elementos de reforço em compósitos cimentícios.

A incorporação de NTCs em concretos e argamassas tem sido objeto de diversas pesquisas científicas, dado o potencial desses nanomateriais para aumentar a resistência mecânica e reduzir a porosidade das matrizes cimentícias. Embora os estudos preliminares já apontam benefícios significativos, a aplicação de NTCs em argamassas ainda se encontra em estágios iniciais de investigação. Pesquisas recentes indicam que esses nanocompósitos podem proporcionar melhorias substanciais nas propriedades do material, como maior resistência e aderência. Além disso, as argamassas reforçadas com NTCs oferecem benefícios adicionais, como maior proteção contra agentes agressivos, melhor isolamento termoacústico e regularização de superfícies.

O presente estudo tem como objetivo investigar o uso de nanotubos de carbono (NTCs) ancorados em rejeitos de minério de ferro, visando aprimorar o desempenho mecânico das argamassas, com ênfase em sua aplicação na construção civil. Entre os objetivos específicos, incluem-se a caracterização dos materiais utilizados na formulação dessas argamassas, a avaliação da resistência à compressão no estado endurecido, a verificação da aderência dos revestimentos e a análise da influência dos NTCs nas propriedades mecânicas e físicas do material.

A relevância deste trabalho reside na busca por novas formulações e resultados que possam contribuir

para o avanço tecnológico na área de materiais de construção. Atualmente, grande parte das pesquisas concentra-se na integração de NTCs com o concreto, enquanto as possíveis vantagens de sua aplicação em argamassas ainda são pouco exploradas. Essa disparidade é evidenciada pelo número de publicações, com 4.446 estudos sobre a utilização de nanotubos de carbono (NTCs) em concreto, em contraste com apenas 531 dedicados à pesquisa de NTCs em argamassas. Essa análise foi realizada em bases respeitáveis, como Google Acadêmico, Periódicos CAPES e Scielo, durante o período de 2004 a 2024.

Diante disso, baseado em uma revisão bibliográfica, este estudo de iniciação científica visa atualizar o conhecimento e explorar novas possibilidades no uso de NTCs em argamassas. Durante 12 meses, foi realizada uma análise crítica de literaturas nacionais e internacionais, incluindo estudos acadêmicos, artigos técnicos e normas relevantes. A partir dessa revisão, foram definidos os procedimentos experimentais, garantindo que seguissem abordagens bem fundamentadas e validadas por pesquisas anteriores. O estudo abrange a justificativa, os objetivos, a metodologia, a análise dos resultados e as conclusões, além de apresentar sugestões para futuras investigações.

Metodologia

A metodologia deste estudo consistiu na preparação de três formulações distintas de argamassa, cada uma com componentes específicos. A primeira formulação foi a argamassa de referência (REF), composta por areia, cimento Portland e água. A segunda formulação incorporou rejeitos de minério de ferro (RMF) como aditivo mineral à argamassa tradicional. A terceira, chamada argamassa com rejeitos de minério de ferro reforçados com nanotubos de carbono (RMF-R), incluiu o rejeito de minério de ferro e 0,2% de nanotubos de carbono como aditivos ao traço referencial da argamassa.

O cimento Portland CPV-ARI foi selecionado devido à sua alta resistência inicial, atendendo aos

requisitos da norma ABNT NBR 16697. A areia utilizada nas misturas foi normalizada conforme a ABNT NBR 7214, sendo classificada em quatro granulometrias: malhas 16, 30, 50 e 100. Os nanotubos de carbono (NTCs) foram sintetizados por meio de um processo de deposição química de vapor (CVD) diretamente sobre as partículas de rejeito de minério de ferro, combinando cloreto de ferro e nitrato de cobalto com óxido de magnésio para formar o catalisador. Este catalisador foi aquecido para remover os voláteis antes da síntese dos NTCs.

A dosagem das argamassas foi baseada em proporções estabelecidas em estudos anteriores de Costal et al. (2023), mantendo uma relação água/cimento constante e variando as quantidades de rejeito de minério de ferro (RMF) e nanotubos de carbono (NTCs) nos diferentes traços, conforme apresentado na Tabela 01.

Tabela 01 - Dosagem dos traços.

Componente (g)	REF (g)	RMF (g)	RMF-R (g)
Cimento Portland	395,00	395,00	395,00
Areia de malha 16	296,00	296,00	296,00
Areia de malha 30	296,00	296,00	296,00
Areia de malha 50	296,00	296,00	296,00
Areia de malha 100	296,00	296,00	296,00
RMF	-	296,00	295,10
RMF-R	0,90	-	0,90
Água (ml)	190,00	190,00	190,00

Fonte: Autoria própria, 2024.

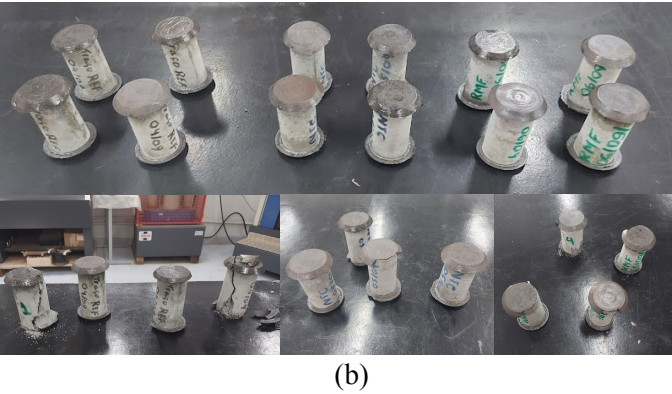
O procedimento experimental foi realizado no Laboratório de Materiais de Construção Civil (LMCC) da Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI), em conformidade com a norma NBR 7215 (2019). Todos os componentes dos traços foram pesados e misturados mecanicamente por 240 segundos. A mistura obtida foi utilizada tanto para moldar quatro corpos de prova cilíndricos (50 mm de diâmetro e 100 mm de altura) quanto para revestir quatro blocos de concreto estrutural de 14cm x 19cm x 39 cm, utilizando apenas uma das suas faces (19 cm x 39 cm). Essas superfícies ou substratos foram empregadas nos testes de aderência, onde a interface argamassa/substrato foi direta, sem o uso da camada de chapisco. O revestimento aplicado tinha 20 mm de espessura, sendo adequado para aplicações em paredes internas e externas, assim como em tetos, propondo um desempenho adequado para

diferentes superfícies. Cada traço foi replicado diversas vezes: o traço REF foi produzido 10 vezes, enquanto os traços RMF e RMF-R foram executados 9 vezes cada, para atender a quantidade de moldes disponíveis e aos ensaios propostos.

Após o período de cura, foram conduzidas análises para avaliar as propriedades mecânicas das argamassas, incluindo testes de resistência à compressão e de aderência, de acordo com as normas pertinentes. A resistência à compressão foi avaliada conforme a ABNT NBR 7215 (2019), enquanto os ensaios de aderência seguiram as normas ABNT NBR 13749 (2013) e NBR 13528 (2019). Para o ensaio de aderência, foram preparadas 16 amostras por traço, sendo necessário que ao menos oito apresentassem resistência à tração (Ra) igual ou superior a 0,20 MPa, para fins de aceitação. Todos os resultados foram considerados válidos, com pelo menos nove amostras do traço REF e oito amostras dos traços RMF-R e RMF superando o limite mínimo estabelecido pela norma.

A seguir, serão apresentados os corpos de prova, que foram submetidos ao capeamento das superfícies superior e inferior com uma mistura de enxofre aquecido, conforme ilustrado na figura 01(a), e posteriormente rompidos, como mostrado na figura 01(b).

Figura 1 - (a) Capeamento dos topos e bases de todos os corpos-de-prova dos três traços; (b) Corpos de prova rompidos.



Fonte: Autoria própria, 2024.

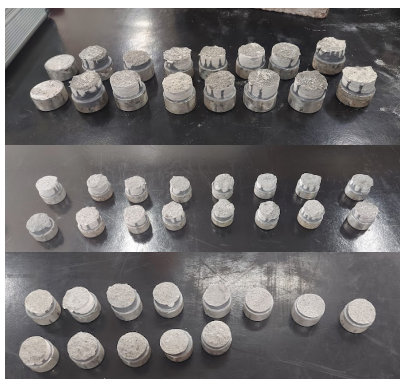
Já na figura 2, é apresentado o posicionamento final das 16 pastilhas nos blocos para os traços RMF-R, REF e RMF, enquanto que na figura 3 estão ilustradas as amostras já rompidas.

Figura 02 - Posicionamento final das pastilhas.



Fonte: Autoria própria, 2024.

Figura 03 - Ruptura na interface dos traços.



Fonte: Autoria própria, 2024.

Ao fim, cada corpo de prova e amostra de ruptura foi medido em altura e diâmetro com um paquímetro, a fim de calcular a força de rompimento. Na Figura 3, observa-se que, no traço REF, duas amostras romperam na interface da cola e pastilha, enquanto as demais apresentaram rupturas na argamassa. Para a mistura RMF-R, a maioria das rupturas ocorreu na argamassa, e na mistura RMF, três pastilhas foram inutilizadas, com as demais também rompendo na argamassa.

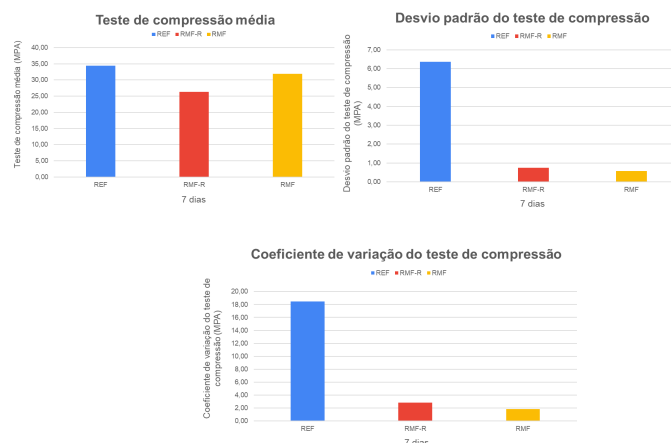
Resultados e discussão

Os resultados das argamassas endurecidas para os traços REF (argamassa tradicional), RMF (com rejeitos de minério de ferro) e RMF-R (com 0,2% de nanotubos de carbono) foram avaliados em testes de resistência à compressão e aderência.

O traço REF apresentou a maior resistência à compressão média de 34,43 MPa, seguido pelo RMF com 31,94 MPa e, por fim, o RMF-R, que obteve a menor resistência, com 26,37 MPa. Os dados indicam que, apesar do traço REF ter a melhor resistência, ele também mostrou a maior variabilidade nas propriedades

mecânicas, com um desvio padrão de 6,36 MPa. Por outro lado, o traço RMF apresentou maior consistência, com um desvio padrão de 0,58 MPa, enquanto o RMF-R teve uma média inferior em resistência.

Gráfico 1- Resistência à Compressão média, desvio padrão e coeficiente de variação.



Fonte: Autoria própria, 2024.

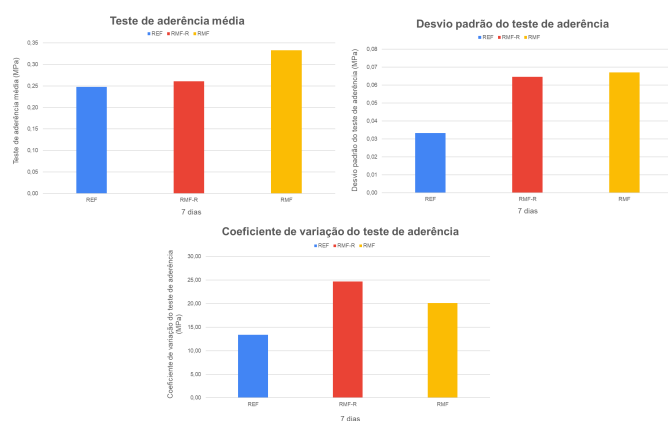
Além disso, a adição de rejeitos de minério de ferro foi eficaz na redução da variabilidade dos resultados, destacando-se como uma adição mineral positiva em uma dosagem padronizada. No entanto, a inclusão de apenas 0,2% de nanotubos de carbono não trouxe melhorias significativas na resistência mecânica, podendo ser insuficiente para potencializar o reforço na microestrutura da argamassa. Estudos anteriores sugerem que a incorporação de nanocompósitos pode melhorar a microestrutura e durabilidade, mas os resultados deste estudo foram limitados, possivelmente devido à dificuldade de dispersão dos nanotubos na matriz do cimento Portland, o que comprometeu o desempenho esperado.

Enquanto que, os resultados de aderência dos corpos de prova, avaliados após 7 dias, mostraram que o traço RMF, que contém rejeitos de minério de ferro, apresentou a melhor média de resistência à aderência com 0,33 MPa. O traço RMF-R, que incorpora 0,2% de nanotubos de carbono, teve uma média de 0,26 MPa, enquanto o traço REF (argamassa tradicional) alcançou apenas 0,25 MPa. Apesar de o traço RMF ter mostrado o melhor desempenho, o REF foi o mais consistente, com o menor desvio padrão de 0,03 MPa, indicando maior confiabilidade nos resultados.

O desvio padrão do traço RMF foi de 0,07 MPa, sugerindo maior variabilidade, enquanto o traço RMF-R apresentou um desvio padrão de 0,06 MPa, refletindo uma consistência moderada. O coeficiente de variação

do traço REF foi o mais baixo, a 13,39%, indicando menor dispersão entre os resultados. Em comparação, o traço RMF-F teve a maior variabilidade, com 24,71%. Isso implica que, embora o RMF tenha apresentado a melhor aderência média, sua maior variabilidade pode ser uma preocupação para a confiabilidade do desempenho da argamassa.

Gráfico 2 - Aderência média, desvio padrão e coeficiente de variação.



A análise conclui que a escolha do traço deve levar em conta tanto a aderência média quanto a consistência dos resultados, que podem ser afetados pelas características do substrato. A interação entre os componentes da mistura e o substrato é crucial para a adesão, e a aglomeração de nanotubos de carbono nas matrizes cimentícias pode comprometer as propriedades mecânicas. Assim, enquanto o RMF demonstrou a melhor aderência média e menor variabilidade, o REF se destacou pela consistência em seus resultados.

Conclusões

Os ensaios revelaram que o traço de referência (REF) apresentou a maior resistência à compressão, mas também demonstrou a maior variabilidade nos resultados de compressão e aderência, possivelmente devido a inconsistências nos materiais ou no processo de mistura. Em contraste, o traço com rejeitos de minério de ferro (RMF) apresentou maior consistência e estabilidade, refletida em menor desvio padrão e coeficiente de variação, além da maior média de aderência, evidenciando os benefícios desse aditivo.

O traço RMF-F, que incorporou nanotubos de carbono (NTC), teve resistência à compressão inferior aos demais traços, mas exibiu boa uniformidade nos resultados de aderência, embora com maior dispersão. Essa variabilidade pode ser atribuída à dificuldade de obter uma dispersão homogênea dos NTCs na mistura,

afetando as propriedades mecânicas da argamassa.

Em suma, a inclusão de rejeitos de minério de ferro (RMF) melhorou a consistência dos resultados, enquanto a adição de NTCs mostrou-se promissora, mas limitada pela dispersão não uniforme. Futuras investigações devem focar na dispersão dos NTCs, na variabilidade dos resultados em ensaios com dosagens constantes de aditivos e na análise do resíduo de material de fundição como agregado miúdo.

Agradecimentos

Expresso minha gratidão à Universidade Federal de Itajubá - Campus Itabira pelo apoio técnico e pelo financiamento, e ao professor Dr. Carlos Augusto de Souza Oliveira pela valiosa orientação e suporte ao longo do projeto. Agradeço, também, a todos que, de alguma maneira, contribuíram para a realização deste trabalho, seja de forma direta ou indireta.

Referências

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 13749: revestimento de paredes e tetos de argamassas inorgânicas — especificação, 2013.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, ABNT NBR 7215:2019. Cimento Portland – Determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2019.
- LEMES, P.S.L., Caracterização do comportamento mecânico e térmico de argamassas de cimento Portland com adição de nanotubo de carbono. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Pampa. Alegrete, 2016.
- MELO, V. S. Nanotecnologia aplicada ao concreto: efeito da mistura física de nanotubos de carbono em matrizes de cimento Portland. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Construção Civil, Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2009.
- COSTAL, Glauber Zerbini *et al.* CNT grown in situ from iron ore tailings: simple dispersion and environmental sustainability. RESEARCH PAPER, [S. l.], p. 1-15, 13 set. 2023.
- ZANELATO, Euzébio B.; ALEXANDRE, Jonas; AZEVEDO, Afonso R. Garcez; MARVILA, Markssuel T.; MONTEIRO, Sergio N. Avaliação da aderência à tração de argamassas aplicadas em blocos cerâmicos. In: CONTRIBUIÇÃO TÉCNICA AO 73º CONGRESSO ANUAL DA ABM – INTERNACIONAL, PARTE INTEGRANTE DA ABM WEEK, 2018, São Paulo, SP, Brasil. ABM Proceedings [...]. [S. l.: s. n.], 02 a 04 de outubro de 2018.