



INFLUÊNCIA DO TIPO DE FIBRA (BASALTO E POLIPROPILENO) NA RESISTÊNCIA QUÍMICA DE ARGAMASSAS CIMENTÍCIAS EXPOSTAS A MEIOS ÁCIDO E BÁSICO

Maysa T. Pellenz¹; André Zimmer²; Sabrina Franz³;

¹Mestranda em Tecnologia e Engenharia de Materiais, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul (IFRS); E-mail: maysathaispe@gmail.com

²Professor Dr. André Zimmer, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul (IFRS).

³Mestranda em Tecnologia e Engenharia de Materiais, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul (IFRS)

Palavras-Chave: Degradação Química, Compósitos Cimentícios, Ataque Químico

Introdução

Atualmente, diversos estudos destacam que a fragilidade e resistência à tração constituem um dos principais problemas quando o assunto é a durabilidade dos materiais cimentícios (Mehta; Monteiro 2014). Esses materiais exibem elevada resistência à compressão, mas baixa resistência à flexão, o que favorece a formação e propagação de fissuras (Ahmad; Khan; Smarzewski, 2021). Desde a antiguidade, reforços como palha em tijolos de barro têm sido incorporados às misturas para tentar diminuir esse problema. Mais recentemente, o emprego de fibras tem se tornado objeto de intensas pesquisas, visando aprimorar as propriedades mecânicas destes materiais.

A durabilidade pode ser definida como a capacidade de um revestimento resistir à ação de agentes agressivos e às condições ambientais ao longo do tempo, sem apresentar perda significativa de suas propriedades físicas, mecânicas e funcionais. Segundo Maciel, Barros e Sabbatini (1998), essa propriedade está diretamente relacionada ao desempenho do material no estado endurecido frente às ações do meio externo, sendo essencial para garantir a vida útil e a segurança das construções. Diversos fatores podem comprometer esse sistema como a formação de fissuras, a aplicação de espessuras inadequadas (especialmente muito grossas), a proliferação de micro-organismos (fungos, 'lodo'), a utilização de argamassas de baixa qualidade e a falta de manutenção ao longo dos anos.

No contexto das argamassas cimentícias, a durabilidade em ambientes quimicamente agressivos é fortemente influenciada tanto pela composição da matriz cimentícia quanto pela incorporação de materiais de reforço como as fibras. Em meios ácidos, ocorre a degradação progressiva das fases hidratadas do cimento, principalmente o hidróxido de cálcio e os silicatos de cálcio hidratados (C-S-H), considerados fundamentais para a resistência mecânica e integridade estrutural do material. Conforme descrito por Hewlett (2004) e Al-Amoudi



(2002), esse processo de dissolução resulta em perda de massa, aumento da porosidade e consequente redução da resistência mecânica das argamassas.

Em ambientes alcalinos, embora a matriz cimentícia seja naturalmente básica, a exposição prolongada pode provocar expansões e alterações microestruturais, especialmente em fibras minerais não tratadas, conforme abordado por Bentur e Mindess (2007). A incorporação de fibras, como as de basalto e polipropileno, tem sido investigada como estratégia para diminuir esses efeitos, atuando no controle da fissuração, aumento da tenacidade e redução da permeabilidade, limitando a penetração de agentes agressivos na matriz (Zollo, 1997; Kakooei et al., 2012).

Além disso, o processo de degradação química é influenciado por diversos parâmetros, como o tempo de cura, o tipo de ácido e base presente no meio (por exemplo, ácido sulfúrico, clorídrico, acético ou hidróxido de sódio) e a concentração da solução. Estudos feitos por Shi e Stegemann (2000), e Beddoe e Dorner (2005), demonstram que essas variáveis podem mudar significativamente a cinética e a intensidade dos mecanismos de deterioração, afetando o desempenho de argamassas em diferentes tipos de condições de exposição.

Investigações experimentais indicam que fibras poliméricas, como as de polipropileno (PP) e poliéster (PE), apresentam maior estabilidade química em meios agressivos, sofrendo pouca degradação e contribuindo para menor perda de massa das argamassas após exposição prolongada, conforme observado por Siddique (2008). Já as fibras de basalto, embora possuam elevada resistência mecânica e boa estabilidade térmica, podem sofrer deterioração em ambientes ácidos e degradação gradual em meios alcalinos, dependendo da composição química e do tratamento superficial aplicado durante a fabricação, como relatado por Sim, Park e Moon (2005) e Fiore et al. (2015).

Pesquisas demonstram que fibras de basalto modificadas com revestimentos especiais podem manter sua integridade estrutural por longos períodos em ambiente alcalino agressivo, enquanto fibras sem tratamento apresentam durabilidade reduzida (WEI; CAO; SONG, 2010). Lipatov et al. (2015) mostraram que fibras de basalto dopadas com ZrO_2 (teor ótimo de 5,7% em massa) formam uma camada de corrosão rica em compostos insolúveis de Zr^{4+} , Fe^{3+} e Mg^{2+} , o que retarda significativamente o ataque alcalino em comparação às fibras não tratadas. Li et al. (2016) detalharam o mecanismo de corrosão de fibras de basalto em meios ácidos e alcalinos, mostrando que a dissolução progressiva das ligações Si–O–Si e a lixiviação dos modificadores de rede são os principais responsáveis pela perda de massa e de resistência mecânica das fibras não protegidas. Fiore et al. (2015), em revisão sobre fibras de basalto e seus compósitos, reforçam que o desempenho químico e mecânico da fibra depende diretamente do tipo de tratamento superficial aplicado antes da incorporação à matriz cimentícia.

A avaliação por variação de massa, associada a análises microestruturais e ensaios mecânicos, permite correlacionar o desempenho das argamassas reforçadas com os mecanismos de degradação química, fornecendo ajuda para o desenvolvimento de materiais



mais duráveis e adequados a aplicações como estruturas industriais, estações de tratamento e obras expostas a efluentes químicos ou poluição atmosférica (BENTUR; MINDESS, 2007).

Material e Métodos

Foram produzidas três formulações de argamassa: argamassa com fibras de basalto (ARG-FB), argamassa com fibras de polipropileno (ARG-FPP) e uma argamassa de referência sem adição de fibras (ARG-REF). O traço de referência adotado foi de 1:6 (cimento:areia), em massa, com relação água/cimento (a/c) igual a 0,60, valor compatível com argamassas de revestimento de uso corrente, conforme a ABNT NBR 13281. Nas formulações com adição de fibras, estas foram incorporadas no teor de 1% em volume em relação ao volume de areia. Para manter constante o volume total da mistura, o volume de areia foi reduzido de 6,00 para 5,94 partes, sendo a diferença compensada pelo volume de fibras adicionadas.

A adição de 1% de fibras em volume ajuda a reduzir a propagação de fissuras e melhora o comportamento da argamassa após a formação de trincas, além de aumentar sua resistência ao impacto. Em contrapartida, pode diminuir a trabalhabilidade, dificultar o acabamento e favorecer a formação de aglomerados de fibras (efeito *balling*). Neste estudo, esse teor foi escolhido por permitir observar com clareza a influência das fibras no desempenho das argamassas, mantendo um equilíbrio entre melhoria das propriedades e viabilidade de preparo e aplicação. A dosagem das argamassas foi inicialmente definida em volume e posteriormente convertida em massa com base na densidade individual de cada constituinte, garantindo a manutenção das proporções estabelecidas entre os materiais em todas as formulações.

O preparo das argamassas foi realizado por mistura manual em recipiente com capacidade de 5 L, adotando-se um procedimento padronizado para todas as bateladas. Foram definidos tempos fixos para cada etapa de mistura, com base em ensaios preliminares e na avaliação da homogeneidade das formulações. A velocidade e a intensidade de mistura foram mantidas constantes, garantindo uniformidade entre as amostras. Após a homogeneização, as argamassas foram moldadas em corpos de prova prismáticos de dimensões $40 \times 40 \times 160$ mm, conforme a ABNT NBR 13279 (2005), para posterior cura e realização dos ensaios experimentais.

Após o período de cura, as amostras foram submetidas aos ensaios de durabilidade por imersão em meios quimicamente agressivos. Nove amostras (três de cada formulação) foram imersas em solução de $\text{HCl } 1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ (meio ácido) por 30 dias, enquanto outras nove foram submetidas à imersão em solução de $\text{NaOH } 1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ (meio básico), também por um período de 30 dias. Ao final de cada etapa, os corpos de prova foram retirados e colocados para secar em estufa por 72 horas até atingirem massa constante, com o objetivo de eliminar a influência do teor de umidade residual sobre os resultados e avaliar de forma precisa a variação de massa



decorrente dos processos de degradação química. Após a secagem, as amostras foram pesadas, além de se realizar avaliação visual por meio de microscopia óptica.

Resultados e Discussão

A avaliação da variação de massa após exposição aos meios agressivos demonstrou que o tipo de fibra influenciou significativamente o comportamento das argamassas. A Tabela 1 apresenta os valores médios de massa inicial e final das formulações após 30 dias de exposição em soluções de $\text{HCl } 1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ e $\text{NaOH } 1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$.

Tabela 1: Variação da massa média das argamassas após exposição aos meios ácido e básico.

Formulação	Massa inicial (g)	Massa final	Massa final
		Meio Básico (g)	Meio Ácido (g)
ARG-FB	$450,60 \pm 0,38$	$514,42 \pm 1,14$	$513,44 \pm 0,59$
ARG-FPP	$485,70 \pm 5,89$	$545,87 \pm 0,98$	$534,86 \pm 0,72$
ARG-REF	$488,09 \pm 9,05$	$533,54 \pm 0,65$	$544,28 \pm 0,75$

A análise estatística por ANOVA indicou diferença significativa entre as formulações ($p < 0,05$), confirmando que o tipo de fibra influencia a resposta das argamassas quando submetidas a ambientes quimicamente agressivos. O teste de Tukey ($\alpha = 0,05$) mostrou que, em meio básico, a ARG-FPP apresentou massa final absoluta significativamente diferente das 4 demais formulações. Como as formulações partiram de massas iniciais distintas, essa diferença em valores absolutos não deve ser interpretada isoladamente como maior absorção de solução, sendo necessário recorrer à variação percentual de massa para uma comparação normalizada entre as formulações.

A Tabela 2 apresenta a variação percentual de massa das argamassas após exposição aos meios básico e ácido, em relação à massa medida ao final da cura. Como as amostras foram secas em estufa até massa constante antes de cada pesagem, o aumento de massa observado não pode ser atribuído à retenção de água livre nos poros, mas sim à incorporação de espécies químicas provenientes das soluções agressivas na microestrutura das argamassas.

Tabela 2: Variação da massa (%).

Formulação	Meio Básico	Meio Ácido
ARG-FB	14,16%	13,95%
ARG-FPP	12,39%	10,12%
ARG-REF	9,31%	11,51%

No meio básico, o ganho de massa mais expressivo, sobretudo nas formulações ARG-FB (14,16%) e ARG-FPP (12,39%), sugere a deposição de compostos de sódio (como carbonatos ou hidróxidos residuais) nos poros e na superfície, decorrentes da reação do NaOH



com os produtos de hidratação do cimento. No meio ácido, o ganho de massa observado, especialmente na formulação ARG-REF (11,51%), pode estar associado à formação de sais de cálcio (como cloretos) resultantes da reação entre o HCl e os compostos cálcicos da matriz cimentícia, que permanecem retidos na estrutura porosa mesmo após a secagem. A formulação ARG-REF apresentou o menor ganho de massa no meio básico (9,31%), o que pode indicar menor reatividade ou menor porosidade disponível para retenção desses produtos de reação em comparação às demais formulações.

Em meio ácido, o teste de Tukey indicou diferença significativa entre a ARG-REF e as formulações reforçadas com fibras, sendo a argamassa de referência a que apresentou maior massa final absoluta após exposição. Entre as formulações com fibras, a ARG-FPP apresentou menor variação percentual de massa em comparação à ARG-FB (10,12% contra 13,95%), evidenciando maior estabilidade química frente ao ataque ácido.

Os resultados indicam que a presença de fibras modifica a interação entre a matriz cimentícia e os agentes agressivos. A maior variação percentual observada na ARG-FB, tanto em meio básico (14,16%) quanto em meio ácido (13,95%), pode estar associada à maior incorporação de produtos de reação química na microestrutura da fibra e da matriz, possivelmente relacionada à ausência de tratamento superficial de proteção nas fibras de basalto utilizadas. Fibras de basalto não tratadas são reconhecidamente mais suscetíveis à dissolução das ligações Si–O–Si e à lixiviação de modificadores de rede em meios agressivos, conforme descrito por Li et al. (2016), o que pode explicar o maior ganho de massa observado nessa formulação.

Por outro lado, a ARG-FPP apresentou o menor ganho percentual de massa em meio ácido e o segundo menor em meio básico, indicando maior estabilidade química das fibras de polipropileno nos meios avaliados. Esse comportamento é consistente com a elevada inércia química reconhecida para fibras poliméricas, como observado por Siddique (2008), que contribui para menor incorporação de produtos de reação na estrutura porosa do compósito.

A ausência de reforço fibroso na ARG-REF a torna estruturalmente mais vulnerável à propagação de fissuras sob ataque químico, mesmo quando sua variação percentual de massa não é a mais elevada entre as formulações. Em meios ácidos, a dissolução de fases hidratadas do cimento, como o hidróxido de cálcio e os silicatos de cálcio hidratados (C-S-H), promove alterações na microestrutura, aumentando a deterioração do material (Hewlett, 2004; Al-Amoudi, 2002).

A análise por microscopia óptica complementou os resultados de variação de massa, revelando alterações microestruturais nos compósitos depois da exposição aos meios agressivos. Nas amostras antes da exposição, as fibras de basalto e polipropileno estavam bem ancoradas na matriz cimentícia, com interface fibra-matriz íntegra e distribuição homogênea ao longo do volume do compósito, evidenciando boa aderência inicial e compatibilidade entre as fibras e a pasta de cimento.

Após 30 dias de exposição às soluções de HCl 1 mol·L⁻¹ e NaOH 1 mol·L⁻¹, observou-se deterioração progressiva da interface fibra-matriz, especialmente nas regiões



mais próximas à superfície. Esse fenômeno foi mais evidente na argamassa com fibras de basalto (ARG-FB), na qual as fibras apresentaram sinais de desaderência, com tendência a se destacar e projetar-se para fora da matriz cimentícia, corroborando o maior ganho percentual de massa por incorporação de produtos de reação registrado nos ensaios gravimétricos e sugerindo maior reatividade química na interface basalto-matriz. Na argamassa com fibras de polipropileno (ARG-FPP), observou-se, de modo geral, melhor manutenção da ancoragem das fibras à matriz cimentícia; entretanto, em meio ácido, foi possível identificar sinais de degradação das próprias fibras, com desfiamento e fragmentação entre os filamentos poliméricos, indicando que, embora a interface fibra-matriz tenha permanecido mais preservada, a fibra em si sofreu alterações estruturais sob exposição prolongada ao HCl. A argamassa de referência (ARG-REF), por não conter fibras, apresentou degradação mais homogênea da matriz, com perda de coesão superficial e formação de camadas friáveis.

Essas observações microestruturais confirmam que a degradação química não se limita à dissolução de fases hidratadas, mas também compromete a interface fibra-matriz e a integridade da própria fibra, por mecanismos distintos conforme o tipo de reforço: desaderência e deslocamento da fibra em relação à matriz, no caso do basalto, e desfiamento dos filamentos poliméricos, no caso do polipropileno. Isso reforça a importância da seleção adequada do tipo de fibra e do tratamento superficial para aplicações em ambientes quimicamente agressivos.

Além disso, a formação de mofo nas amostras expostas ao meio básico após retirada do recipiente indica que a retenção de umidade pode comprometer a durabilidade a longo prazo, introduzindo um novo aspecto relevante para avaliação desses materiais. A presença de matéria orgânica em ambientes úmidos e alcalinos sugere que a porosidade aberta e a capacidade de retenção de água das argamassas reforçadas podem favorecer o desenvolvimento biológico, o qual, por sua vez, pode acelerar processos de deterioração por meio da produção de ácidos orgânicos e enzimas degradativas. Esse fenômeno, pouco explorado na literatura sobre durabilidade química de argamassas com fibras, merece atenção em investigações futuras, especialmente para aplicações em ambientes com alta umidade relativa e exposição contínua a soluções alcalinas.

Conclusões

Os resultados indicam que a incorporação de fibras influencia diretamente o desempenho das argamassas em ambientes quimicamente agressivos, mas de formas distintas conforme o tipo de fibra e o meio de exposição. A argamassa com fibras de basalto (ARG-FB) apresentou o maior ganho percentual de massa nos dois meios avaliados e sinais de desaderência na interface fibra-matriz, sugerindo maior reatividade química e possível ausência de tratamento superficial de proteção nas fibras utilizadas.

A argamassa com fibras de polipropileno (ARG-FPP), por outro lado, manteve melhor ancoragem da fibra à matriz cimentícia e apresentou o menor ganho percentual de massa em



meio ácido, indicando boa estabilidade química da interface. Entretanto, observou-se desfiamento dos filamentos poliméricos em meio ácido, evidenciando um mecanismo de degradação distinto, relacionado à fibra em si e não à interface fibra-matriz. Já a argamassa de referência, sem fibras, apresentou o menor ganho de massa em meio básico, mas permanece estruturalmente mais vulnerável à propagação de fissuras pela ausência de reforço fibroso.

De modo geral, os resultados mostram que o tipo de fibra influencia diretamente a durabilidade química das argamassas, sem que uma única formulação se destaque como superior nos dois meios simultaneamente e sob todos os critérios avaliados. Os dados reforçam a importância de tratamentos superficiais nas fibras de basalto para reduzir sua reatividade em ambientes agressivos, especialmente em meio alcalino, bem como a atenção à degradação intrínseca dos filamentos poliméricos sob exposição ácida prolongada.

Para aprofundar a análise, estudos futuros podem incluir técnicas como microscopia eletrônica de varredura (MEV) e espectroscopia por energia dispersiva de raios X (EDX), permitindo entender melhor os mecanismos envolvidos. Essas análises podem ajudar a relacionar a variação de massa com mudanças na porosidade, na interface entre fibra e matriz e na composição química do material. Além disso, também serão feitos estudos de longa duração (superiores a 180 dias), em condições reais ou aceleradas, bem como a avaliação de diferentes teores e combinações de fibras, incluindo sistemas híbridos.

Referências

- AHMAD, W.; KHAN, M.; SMARZEWSKI, P. **Effect of Short Fiber Reinforcements on Fracture Performance of Cement-Based Materials: A Systematic Review Approach.** *Materials*, v. 14, n. 7, p. 1745, 2021.
- AL-AMOUDI, O. S. B. **Attack on plain and blended cements exposed to aggressive sulfate environments.** *Cement and Concrete Composites*, v. 24, n. 3-4, p. 305-316, 2002.
- BEDDOE, R. E.; DORNER, H. W. **Modelling acid attack on concrete: Part I. The essential mechanisms.** *Cement and Concrete Research*, v. 35, n. 12, p. 2333-2339, 2005.
- BENTUR, A.; MINDESS, S. **Fibre Reinforced Cementitious Composites.** 2. ed. London: Taylor & Francis, 2007.
- IORE, V.; SCALICI, T.; DI BELLA, G.; VALENZA, A. **A review on basalt fibre and its composites.** *Composites Part B: Engineering*, v. 74, p. 74-94, 2015.
- HEWLETT, P. C. **Lea's Chemistry of Cement and Concrete.** 4. ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2004.
- KAKOOEI, S.; JAMSHIDI, M.; MOHAMMAD, R. T.; AKIL, H. M.; HASSAN, A. **The effects of polypropylene fibers on the properties of reinforced concrete structures.** *Construction and Building Materials*, v. 27, n. 1, p. 73-77, 2012.
- LI, Z.; XIAO, T.; PAN, Q.; CHENG, J.; ZHAO, S. **Corrosion behaviour and mechanism of basalt fibres in acidic and alkaline environments.** *Corrosion Science*, v. 110, p. 96-105, 2016.
- LIPATOV, Y. V.; GUTNIKOV, S. I.; MANYLOV, M. S.; ZHUKOVSKAYA, E. S.; LAZORYAK, B. I. **High alkali-resistant basalt fiber for reinforcing concrete.** *Materials & Design*, v. 73, p. 60-66, 2015.



MACIEL, L. L.; BARROS, M. M. S. B.; SABBATINI, F. H. **Recomendações para execução de revestimentos de argamassa para paredes de vedação e tetos**. São Paulo: EPUSP, 1998. (Relatório Técnico).

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concrete: Microstructure, Properties, and Materials**. 4. ed. New York: McGraw-Hill Education, 2014.

SHI, C.; STEGEMANN, J. A. **A review of the factors influencing the leaching of cement-based waste forms**. *Cement and Concrete Research*, v. 30, n. 3, p. 333-345, 2000.

SIDDIQUE, R. **Waste Materials and By-Products in Concrete**. Berlin: Springer, 2008.

SIM, J.; PARK, C.; MOON, D. Y. **Characteristics of basalt fiber as a strengthening material for concrete structures**. *Composites Part B: Engineering*, v. 36, n. 6-7, p. 504-512, 2005.

WEI, B.; CAO, H.; SONG, S. **Degradation of basalt fibre and glass fibre/epoxy resin composites in seawater**. *Composites Part B: Engineering*, v. 41, n. 2, p. 126-132, 2010.

ZOLLO, R. F. **Fiber-reinforced concrete: an overview after 30 years of development**. *Cement and Concrete Composites*, v. 19, n. 2, p. 107-122, 1997.