

Avaliação experimental e fotogramétrica da deterioração hidráulica em argamassas com incorporação de resíduos de celulose (dregs e grits)

Ana Júlia Batista Oliveira¹ & Bruno de Oliveira Lázaro²

Resumo: A incorporação de resíduos industriais em materiais cimentícios tem se consolidado como estratégia promissora para promover a sustentabilidade na construção civil. Entre esses resíduos, destacam-se os dregs e grits, subprodutos do processo kraft de produção de celulose, com potencial de aplicação como materiais alternativos em argamassas. No entanto, ainda são limitados os estudos que avaliam o desempenho desses materiais sob condições de ação hidráulica. Neste contexto, este trabalho tem como objetivo analisar a influência da incorporação de dregs e grits no comportamento e na resistência à deterioração hidráulica de argamassas cimentícias. Inicialmente, foram realizados ensaios de sedimentação, turbidez e evaporação, a fim de caracterizar o comportamento dos resíduos em meio aquoso. Em seguida, foram produzidas argamassas com substituição parcial de cimento e de agregado miúdo nos teores de 10%, 20% e 30%. O desempenho das argamassas foi avaliado por meio de ensaio de deterioração hidráulica utilizando jato de água pressurizada, com análise comparativa baseada em inspeção visual e fotogrametria. Os resultados indicaram que a substituição do cimento comprometeu de forma mais significativa a integridade das argamassas, enquanto a substituição da areia promoveu alterações predominantemente físicas, com menor impacto estrutural. Os grits apresentaram comportamento mais favorável, contribuindo para maior resistência à erosão superficial, ao passo que os dregs demonstraram maior instabilidade e suscetibilidade à desagregação. Conclui-se que o uso desses resíduos é tecnicamente viável, desde que sejam considerados o tipo de material, o teor de incorporação e a forma de substituição, especialmente em aplicações sujeitas à ação de escoamentos hidráulicos.

Abstract: The incorporation of industrial residues into cementitious materials has emerged as a promising strategy to enhance sustainability in civil construction. Among these residues, dregs and grits, by-products of the kraft pulp production process, stand out due to their potential application as alternative materials in mortars. However, studies addressing their performance under hydraulic action remain limited. In this context, this study aims to evaluate the influence of dregs and grits incorporation on the behavior and hydraulic deterioration resistance of cementitious mortars. Initially, sedimentation, turbidity, and evaporation tests were carried out to characterize the behavior of the residues in an aqueous medium. Subsequently, mortars were produced with partial replacement of cement and fine aggregate at levels of 10%, 20%, and 30%. The performance of the mortars was assessed through a hydraulic deterioration test using a pressurized water jet, combined with visual inspection and photogrammetric analysis. The results indicated that cement replacement significantly compromised the structural integrity of the mortars, whereas sand replacement led mainly to physical changes with less severe impact. Grits exhibited more favorable behavior, contributing to improved resistance to surface erosion, while dregs showed higher instability and susceptibility to disintegration. It is concluded that the use of these residues is technically feasible, provided that the type of material, incorporation level, and substitution method are carefully considered, particularly in applications exposed to hydraulic flow conditions.

Palavras-Chave: argamassas; deterioração hidráulica; resíduos industriais.

1) Laboratório de Hidráulica. Faculdade de Engenharia Civil. Universidade Federal de Uberlândia (ana.juliabo@ufu.br)

2) Laboratório de Hidráulica. Faculdade de Engenharia Civil. Universidade Federal de Uberlândia. (bruno.lazaro@ufu.br)

Keywords: mortars; hydraulic deterioration; industrial waste.

INTRODUÇÃO

A crescente demanda por soluções sustentáveis na engenharia civil tem impulsionado o desenvolvimento de materiais cimentícios alternativos a partir da incorporação de resíduos industriais, em consonância com os princípios da economia circular e da redução de impactos ambientais. Nesse contexto, destacam-se os resíduos provenientes da indústria de celulose, em especial os *dregs* e *grits*, gerados no processo kraft de produção de polpa celulósica, cuja destinação ainda se concentra majoritariamente em aterros industriais (GARTNER *et al.*, 2002; SIQUEIRA e HOLANDA, 2013; SCRIVENER *et al.*, 2016).

Paralelamente às questões ambientais, observa-se um avanço significativo na compreensão dos mecanismos de interação entre escoamentos e materiais de construção, especialmente no que se refere à durabilidade de superfícies expostas à ação da água. Estruturas hidráulicas, sistemas de drenagem urbana e elementos construtivos sujeitos a escoamentos concentrados ou pressurizados estão frequentemente expostos a processos de deterioração associados à erosão superficial, à lixiviação de compostos solúveis e à perda de coesão da matriz cimentícia. Tais fenômenos estão diretamente relacionados às propriedades físicas e microestruturais dos materiais, como porosidade, distribuição granulométrica e características da zona de transição interfacial (MARTÍNEZ-LAGE *et al.*, 2016; MARTINS *et al.*, 2007; METHA e MONTEIRO, 2008).

Apesar dos avanços no estudo da incorporação de resíduos como *dregs* e *grits* em argamassas, a literatura tem se concentrado predominantemente na avaliação de propriedades mecânicas, como resistência à compressão e absorção de água, havendo uma lacuna significativa quanto ao desempenho desses materiais sob ação hidráulica direta. Em particular, são escassos os estudos que investigam os mecanismos de deterioração induzidos por escoamentos pressurizados, condição frequentemente associada a situações reais de serviço, como jatos de limpeza, escoamentos concentrados em dispositivos hidráulicos e impactos localizados de fluidos em superfícies cimentícias (OLIVEIRA *et al.*, 2017; QUINA e PINHEIRO, 2020).

Nesse contexto, a análise do comportamento de argamassas modificadas com resíduos industriais sob ação de escoamentos representa uma interface direta entre a engenharia de materiais e a hidráulica aplicada. Em estruturas hidráulicas, tais como canais, vertedores, dissipadores de energia, galerias de drenagem, dispositivos de controle de vazão e unidades de tratamento de água e esgoto, a durabilidade dos materiais está diretamente associada à sua capacidade de resistir às tensões impostas pelo escoamento.

Processos de erosão superficial, lixiviação e desagregação podem comprometer o desempenho hidráulico e reduzir a vida útil dessas estruturas. Assim, a avaliação da deterioração hidráulica de compósitos cimentícios contendo resíduos industriais fornece subsídios importantes para o desenvolvimento de materiais mais sustentáveis e potencialmente aplicáveis em obras hidráulicas e de saneamento. A compreensão dos mecanismos de degradação associados à interação fluido-estrutura permite não apenas avaliar a viabilidade técnica desses materiais, mas também contribuir para o dimensionamento e a especificação de soluções mais duráveis em ambientes sujeitos à ação da água (SANTOS *et al.*, 2019; TORRES *et al.*, 2020).

Diante desse cenário, o presente trabalho tem como objetivo avaliar experimentalmente a influência da incorporação de *dregs* e *grits* no comportamento e na resistência à deterioração hidráulica de argamassas cimentícias. Para isso, são analisadas tanto as propriedades dos resíduos em meio aquoso quanto o desempenho das argamassas submetidas à ação de jato de água

pressurizada, buscando estabelecer relações entre as características físico-químicas dos materiais e os mecanismos de degradação observados.

MÉTODOS

Materiais utilizados

Foram utilizados cimento Portland, agregado miúdo natural (areia quartzosa), água potável e resíduos industriais *dregs* e *grits*, oriundos do processo kraft de produção de celulose. As amostras de resíduos foram coletadas em uma indústria localizada no município de Uberlândia-MG e acondicionadas em recipientes hermeticamente fechados, de modo a preservar suas características físico-químicas e evitar variações de umidade ao longo do período experimental (Figura 1).



Figura 1 – Amostras de resíduos celulósicos utilizados.

Os resíduos foram classificados em três grupos distintos, denominados Amostra A, correspondente aos *grits* de maior granulometria, Amostra B, referente aos *grits* de menor granulometria, e Amostra C, composta por *dregs*. Essa distinção foi adotada com base em identificação visual e diferenças granulométricas aparentes, com o objetivo de avaliar a influência da natureza e da finura do material no comportamento das argamassas.

Caracterização dos resíduos em meio aquoso

A caracterização dos resíduos em meio aquoso foi conduzida com o objetivo de investigar sua estabilidade, dispersão e comportamento físico em suspensão, parâmetros relevantes para sua aplicação em matrizes cimentícias e diretamente associados à interação com a água durante o preparo e a exposição em serviço. Para os ensaios, adotou-se uma proporção fixa entre massa de resíduo e volume de água destilada, garantindo a comparabilidade entre as amostras.

Inicialmente, no ensaio de evaporação, as suspensões foram submetidas à secagem em estufa a 105 °C até massa constante, utilizando cápsulas de porcelana previamente pesadas. A partir das medições de massa antes e após o processo, foram determinados a massa de sólidos remanescentes, a fração evaporada e a variação percentual de massa, permitindo avaliar a quantidade de material efetivamente dissolvido ou disperso.

O comportamento de sedimentação foi avaliado em provetas graduadas de 1000 mL, nas quais as suspensões foram mantidas em repouso por um período de 24 horas. Após esse intervalo, foi registrada a altura da coluna de sedimentos, bem como observada a estratificação das partículas, possibilitando distinguir frações de diferentes granulometrias e inferir a tendência de segregação dos resíduos.

Por fim, a turbidez do sobrenadante foi determinada por meio de turbidímetro digital, com resultados expressos em unidades nefelométricas de turbidez (NTU). Esse parâmetro foi utilizado como indicador da concentração de partículas finas em suspensão e da estabilidade da dispersão ao

longo do tempo, fornecendo subsídios para a análise do comportamento reológico potencial das misturas.

Produção das argamassas com diferentes incorporações

As argamassas foram produzidas a partir de um traço de referência 1:2 (cimento:areia), com proporções fixas de 235 g de cimento, 533 g de areia e 100 mL de água, mantendo-se constante a relação água/cimento. A escolha desse traço visou representar uma argamassa convencional de uso corrente, permitindo a comparação direta entre o material de referência e as misturas modificadas.

A partir do traço base, foram elaboradas composições com substituição parcial de cimento e de agregado miúdo pelos resíduos *dregs* e *grits*, nos teores de 10%, 20% e 30%, em massa. Para cada tipo de resíduo (Amostra A – *grits* grossos, Amostra B – *grits* finos e Amostra C – *dregs*), foram consideradas duas formas de incorporação: substituição do cimento, com impacto direto na fração ligante, e substituição da areia, com influência predominantemente física na estrutura da matriz.

No total, foram moldados 20 corpos de prova, sendo 2 correspondentes à argamassa de referência (sem incorporação de resíduos) e 18 referentes às argamassas modificadas, distribuídas entre os diferentes tipos de resíduos, teores de substituição e formas de incorporação.

Por se tratar de uma investigação exploratória e preliminar, voltada principalmente à identificação de tendências de comportamento hidráulico associadas à incorporação de resíduos celulósicos, cada condição experimental foi representada por um corpo de prova. Assim, os resultados apresentados possuem caráter comparativo e qualitativo, permitindo a identificação de padrões de deterioração e mecanismos de degradação.

Estudos futuros deverão contemplar um número maior de réplicas experimentais, possibilitando análises estatísticas mais robustas e a quantificação da variabilidade dos resultados. Os corpos de prova foram moldados em formato cilíndrico, com dimensões aproximadas de 50 mm de diâmetro e 100 mm de altura, compatíveis com ensaios laboratoriais de pequena escala e adequados à aplicação do jato de água pressurizada na superfície superior.

O processo de mistura foi realizado manualmente, iniciando-se pela homogeneização dos materiais secos, de modo a garantir a distribuição uniforme dos resíduos na matriz. Em seguida, a água foi adicionada de forma gradual, mantendo-se a mistura até a obtenção de uma massa homogênea, sem evidência de segregação ou exsudação. Após a moldagem, os corpos de prova foram mantidos em condições controladas de cura, em ambiente úmido, por período suficiente para estabilização das propriedades no estado endurecido antes da realização dos ensaios hidráulicos.

Ensaio de deterioração hidráulica

O desempenho das argamassas frente à ação de escoamentos foi avaliado por meio de ensaio de deterioração hidráulica, baseado na aplicação de jato de água pressurizada sobre a superfície dos corpos de prova. O ensaio foi conduzido com tempo de exposição de 60 segundos, mantendo-se condições padronizadas de aplicação, incluindo incidência perpendicular do jato, distância constante entre o bico e a superfície e regime contínuo de escoamento (Figura 2).

A configuração experimental adotada buscou reproduzir, em escala laboratorial, condições de ação erosiva localizada associadas a escoamentos concentrados ou pressurizados, nos quais a interação fluido-superfície resulta na aplicação de tensões de cisalhamento e forças de impacto capazes de promover o desgaste da matriz cimentícia. Dessa forma, o ensaio permite avaliar, de maneira qualitativa e comparativa, a resistência superficial das argamassas frente à ação hidráulica.



Figura 2 – Esquema de ensaio de deterioração hidráulica (Baseado na ABNT NBR 13276 e 13279).

Após a aplicação do jato, os corpos de prova foram analisados quanto à perda de material superficial, formação de cavidades, desagregação da matriz, exposição de agregados e alteração da rugosidade da superfície. A análise foi conduzida de forma comparativa entre as diferentes composições, permitindo identificar a influência do tipo de resíduo, do teor de substituição e da forma de incorporação no desempenho hidráulico das argamassas.

Análise por técnica fotogramétrica

A avaliação da deterioração superficial foi complementada por análise visual baseada em registros fotográficos das amostras antes e após o ensaio hidráulico. As imagens foram analisadas de forma comparativa em ambiente digital próprio, permitindo identificar padrões de degradação e classificar qualitativamente as regiões de dano, distinguindo áreas de maior intensidade de erosão e regiões de desgaste moderado.

Essa abordagem contribuiu para a sistematização da análise dos resultados, possibilitando uma interpretação mais clara dos mecanismos de deterioração associados à interação entre o escoamento e a matriz cimentícia modificada pela incorporação dos resíduos.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Comportamento dos resíduos celulósicos em meio aquoso

Os ensaios de caracterização em meio aquoso evidenciaram diferenças significativas no comportamento físico dos resíduos analisados, especialmente no que se refere à estabilidade em suspensão, à presença de partículas finas e à capacidade de sedimentação.

Os resultados de evaporação indicaram maior massa de sólidos remanescentes para as amostras de *grits* (Amostras A e B), com valores de 4,6141 g e 4,6845 g, respectivamente, em comparação aos *dregs* (Amostra C), que apresentaram 2,2595 g. Esse comportamento sugere maior quantidade de material disperso na fase líquida para os *grits*, indicando maior contribuição de partículas finas ou parcialmente suspensas no meio aquoso.

Os valores de turbidez corroboram essa interpretação, evidenciando níveis significativamente mais elevados para as amostras de *grits* (1101 NTU para ambas), enquanto os *dregs* apresentaram turbidez substancialmente inferior (269 NTU). Esses resultados indicam maior concentração de partículas em suspensão nas amostras de *grits*, o que pode estar associado à presença de frações granulométricas mais finas ou à maior dispersibilidade do material.

A análise de sedimentação complementa essa avaliação, indicando maiores alturas de coluna sedimentada para os *grits*, especialmente para a Amostra B (0,041 m), seguida da Amostra A (0,037

m), enquanto os *dregs* apresentaram menor valor (0,035 m). Esse comportamento sugere que, embora os *grits* apresentem maior quantidade de material em suspensão inicialmente, também possuem maior fração de partículas com capacidade de sedimentação ao longo do tempo. Por outro lado, os *dregs* tendem a apresentar menor deposição, possivelmente associada à presença de partículas mais finas, de menor densidade ou com comportamento mais estável na suspensão.

Do ponto de vista físico, os resultados indicam que os *grits* apresentam comportamento bifásico caracterizado por elevada dispersão inicial de partículas, seguida por significativa sedimentação, evidenciando uma distribuição granulométrica mais ampla. Em contraste, os *dregs* apresentam menor turbidez e menor massa de sólidos evaporados, indicando menor quantidade de material disperso, porém com menor tendência à sedimentação, o que pode estar relacionado a características físico-químicas específicas do resíduo.

Essas diferenças são particularmente relevantes no contexto da incorporação em matrizes cimentícias, uma vez que a presença de partículas finas e a capacidade de dispersão em meio aquoso influenciam diretamente a microestrutura, a porosidade e a coesão interna das argamassas. Assim, os *grits* tendem a atuar como materiais de preenchimento com potencial contribuição granulométrica, enquanto os *dregs* podem apresentar comportamento distinto, com implicações na estabilidade e na interação com a matriz cimentícia.

Desempenho das argamassas frente à deterioração hidráulica

A avaliação do desempenho das argamassas submetidas ao ensaio de deterioração hidráulica evidenciou diferenças significativas entre as composições analisadas, demonstrando a influência direta do tipo de resíduo, do teor de substituição e da forma de incorporação na resistência à ação do escoamento. Os resultados obtidos após o ensaio podem ser vistos na Figura 3, que representa a série de corpos de prova antes e após o teste de deterioração (círculos em vermelho indicam as regiões de maior deterioração).

A argamassa de referência apresentou comportamento relativamente estável, com desgaste superficial moderado e ausência de desagregação significativa da matriz, caracterizando um padrão de deterioração predominantemente superficial. Esse comportamento estabelece um referencial importante para a análise comparativa das argamassas modificadas.

Nas argamassas com substituição parcial do cimento, observou-se, de maneira geral, maior suscetibilidade à deterioração hidráulica, independentemente do tipo de resíduo incorporado. Esse resultado está associado à redução da fração ligante, o que implica menor coesão interna da matriz cimentícia e maior facilidade de remoção de material sob ação do jato de água. Em teores mais elevados de substituição (20% e 30%), foram observados processos mais intensos de desgaste, com formação de cavidades e exposição de agregados, indicando comprometimento da integridade superficial.

Por outro lado, as argamassas com substituição do agregado miúdo apresentaram desempenho relativamente superior, com menor intensidade de deterioração. Nesse caso, a fração ligante permanece inalterada, e as modificações estão associadas principalmente à redistribuição granulométrica do sistema, o que pode contribuir para uma matriz mais densa e com menor suscetibilidade à erosão superficial.

A comparação entre os diferentes resíduos indica que as argamassas contendo *grits* apresentaram, de modo geral, melhor desempenho frente à ação hidráulica, especialmente em teores mais baixos de incorporação. Esse comportamento pode ser interpretado com base nos resultados apresentados ainda na Tabela 1, nos quais os *grits* apresentaram maior presença de partículas em

suspensão e comportamento granulométrico mais amplo, favorecendo o preenchimento de vazios e a densificação da matriz cimentícia. Esse efeito contribui para maior resistência à ação erosiva do escoamento.

Em contraste, as argamassas com incorporação de *dregs* apresentaram maior suscetibilidade à deterioração, com evidências de desagregação superficial, perda de material e maior exposição de agregados. Embora os *dregs* apresentem menor turbidez e menor quantidade de material disperso em meio aquoso, sua menor capacidade de sedimentação e possíveis características físico-químicas podem resultar em menor contribuição para o empacotamento granular e menor eficiência na melhoria da microestrutura da matriz.



Figura 3 – Registros fotogramétricos dos corpos de prova antes e após ensaio de deterioração hidráulica.

De forma geral, os resultados indicam que o desempenho das argamassas frente à deterioração hidráulica está diretamente relacionado à capacidade dos resíduos de modificar a estrutura interna do material. Resíduos com comportamento que favorece o preenchimento de vazios e a melhoria do empacotamento granular tendem a aumentar a resistência à erosão, enquanto aqueles com menor contribuição estrutural podem comprometer a coesão e a durabilidade do compósito.

CONCLUSÃO

Este estudo avaliou a influência da incorporação de *dregs* e *grits* no comportamento e na resistência à deterioração hidráulica de argamassas cimentícias. Os resultados indicaram que a substituição parcial do cimento aumenta a suscetibilidade à degradação, enquanto a substituição do agregado miúdo apresenta menor impacto estrutural.

As argamassas com *grits* apresentaram melhor desempenho frente à ação hidráulica, especialmente em baixos teores, devido ao efeito de preenchimento e à melhoria do empacotamento

granular. Por outro lado, as misturas com *dregs* mostraram maior tendência à deterioração, associada à menor contribuição para a densificação da matriz.

De forma geral, a incorporação de resíduos é viável, desde que sejam adequadamente definidos o tipo de material, o teor e a forma de aplicação. Para condições sujeitas à ação hidráulica, recomenda-se o uso de *grits* em substituição parcial ao agregado miúdo, enquanto o uso de *dregs* requer maior cautela. A metodologia adotada mostrou-se eficaz para a avaliação comparativa do desempenho hidráulico de materiais cimentícios.

Sob a perspectiva da engenharia hidráulica e do saneamento, os resultados indicam que argamassas contendo *grits* apresentam potencial para aplicação em elementos construtivos sujeitos à ação da água, tais como revestimentos de canais, dispositivos de drenagem, estruturas de dissipação e componentes de sistemas hidráulicos. Além de contribuir para o aproveitamento de resíduos industriais, a utilização desses materiais pode favorecer o desenvolvimento de soluções mais sustentáveis para obras hidráulicas, desde que observadas as limitações associadas ao teor de incorporação e ao tipo de resíduo empregado.

REFERÊNCIAS

- GARTNER, E. M.; YOUNG, J. F.; DAMIDOT, D. A.; JAWED, I. (2002). "Hydration of Portland cement." In: Structure and Performance of Cements. London: Spon Press, pp. 57–113.
- MARTÍNEZ-LAGE, I.; VELAY-LIZANCOS, M.; VÁZQUEZ-BURGO, P.; RIVAS-FERNÁNDEZ, M.; VÁZQUEZ-HERRERO, C.; RAMÍREZ-RODRÍGUEZ, A.; MARTÍN-CANO, M. (2016). "Concretes and mortars with waste paper industry: Biomass ash and dregs." Journal of Environmental Management, 181, pp. 863–873.
- MARTINS, F. M.; MARTINS, J. M.; FERRACIN, L. C.; DA CUNHA, C. J. (2007). "Mineral phases of green liquor dregs, slaker grits, lime mud and wood ash of a Kraft pulp and paper mill." Journal of Hazardous Materials, 147(1–2), pp. 610–617.
- MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. (2008). "Concreto: microestrutura, propriedades e materiais." São Paulo: IBRACON, 674 p.
- OLIVEIRA, K. A.; NAZÁRIO, B. I.; OLIVEIRA, A. P. N.; HOTZA, D.; RAUPP-PEREIRA, F. (2017). "Industrial wastes as alternative mineral addition in Portland cement and as aggregate in coating mortars." Materials Research, 20(2), pp. 358–364.
- QUINA, M. J.; PINHEIRO, C. T. (2020). "Inorganic waste generated in Kraft pulp mills: The transition from landfill to industrial applications." Applied Sciences, 10(7), pp. 2317.
- SANTOS, V. R.; CABRELON, M. D.; TRICHÊS, E. S.; QUINTEIRO, E. (2019). "Green liquor dregs and slaker grits residues characterization of a pulp and paper mill for future application on ceramic products." Journal of Cleaner Production, 240, pp. 1–7.
- SCRIVENER, K.; SNELLINGS, R.; LOTHENBACH, B. (2016). "A practical guide to microstructural analysis of cementitious materials." Boca Raton: CRC Press, 540 p.
- SIQUEIRA, F. B.; HOLANDA, J. N. F. (2013). "Reuse of grits waste for the production of soil-cement bricks." Journal of Environmental Management, 131, pp. 1–6.
- TORRES, C. M. M. E.; SILVA, C. M.; PEDROTI, L. G.; FERNANDES, W. E. H.; BALLOTIN, F. C.; ZANUNCIO, A. J. V. (2020). "Dregs and grits from kraft pulp mills incorporated to Portland cement clinker." Journal of Material Cycles and Waste Management, 22(3), pp. 851–861.