OTIMIZAÇÃO DE MISTURAS CIMENTÍCIAS COM O RESÍDUO DREGS E ESCÓRIA DE ALTO FORNO: APLICAÇÃO DO MÉTODO DE EMPACOTAMENTO

Optimization of cementitious mixtures with dregs waste and blast furnace slag: application of the packing method

Juliane Rodrigues Falcão
Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) | Porto Alegre, RS | falcao.juliane1@gmail.com

Rodrigo Henryque Reginato Quevedo Melo
Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) | Porto Alegre, RS| rodrigohquevedo@gmail.com

Júlia Matzenbacher Henicka Germano
Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) | Porto Alegre, RS | jugermano2283@gmail.com

Ângela Borges Masuro
Universidade Federal do Rio Grande do Sul | Porto Alegre, RS | angela.masuero@ufrgs.br

Denise Carpena Coitinho Dal Molin
Universidade Federal do Rio Grande do Sul | Porto Alegre, RS | dmolin@ufrgs.br

Resumo

O resíduo dregs, da indústria de celulose, apresenta características físicas e químicas promissoras para aplicação em materiais cimentícios, destacando-se como alternativa sustentável. Este estudo explora o uso de dregs em misturas ternárias como substituto parcial do cimento, nas proporções de 0%, 5%, 10% e 15%. As misturas também incluem escória de alto forno e cimento CP V-ARI. Em todas as misturas tem-se a substituição de 25% do CP V-ARI por combinações de escória e dregs. Considerando o potencial do dregs como filer, foi aplicado o método de empacotamento de Wong e Kwan (2008) e De Larrard (1999) para otimizar as proporções de mistura. Ensaios como mini-slump test, densidade de massa e resistência à compressão foram realizados. Os resultados evidenciam que o método de empacotamento melhora o desempenho mecânico das misturas, apesar de não apresentarem diferença significativa, são satisfatórios visto que é feita a substituição do cimento por até 15% do resíduo.

Palavras-chave: Resíduo dregs; Empacotamento; Pastas.

ABSTRACT

The dregs waste from the pulp industry exhibits promising physical and chemical properties for application in cementitious materials, standing out as a sustainable alternative. This study explores the use of dregs in ternary mixtures as a partial replacement for cement in proportions of 0%, 5%, 10%, and 15%. The mixtures also include blast furnace slag and CP V-ARI cement. In all mixtures, 25% of the CP V-ARI is replaced with combinations of slag and dregs. Considering the potential of dregs as a filler, the packing method proposed by Wong and Kwan (2008) and De Larrard (1999) was applied to optimize the mix proportions. Tests such as mini-slump, bulk density, and compressive strength were conducted. The results show that the packing method improves the mechanical performance of the mixtures, although they do not present a significant difference, they are satisfactory since the cement is replaced by up to 15% of the waste.

Keywords: Dregs waste; Particle packing; Pastes.

1 INTRODUÇÃO

A indústria de celulose é responsável pela geração de cerca de 11,34 a 54,32 quilos do resíduo dregs por tonelada de celulose produzida (Falcão *et al.*, 2024). No Brasil, em 2023, a produção de celulose foi de 24,3 milhões de toneladas (IBÁ, 2024). A partir da grande produção de celulose, a geração do resíduo representa um grande impacto ambiental visto que o resíduo usualmente é enviado para aterros por falta de destinação concreta. O resíduo dregs, gerado a partir do processo de clarificação do licor verde do processo *kraft*, possui uma composição predominantemente composta por carbonato de cálcio (cerca de 47%) com a presença substancial de carbonato de sódio (cerca de 5%).

Estudos que analisaram as propriedades de argamassas diante da substituição parcial do cimento por dregs constataram que, em pequenas porcentagens, o resíduo pode contribuir de forma satisfatória para a resistência mecânica, no entanto, em quantidades elevadas, sua incorporação tende a impactar negativamente essa propriedade (Martínez-Lage *et al.*, 2016; Oliveira; Costa; Motta, 2024; Santos *et al.*, 2018). Essa redução pode ocorrer porque o resíduo, sem propriedades pozolânicas, atua apenas como fíler. Ele melhora o empacotamento das partículas e reduz a porosidade, mas, sem reatividade química, seu excesso aumenta a demanda de água, comprometendo a resistência.

Falcão *et al*. (2024) constataram que um dos principais desafios relacionados ao beneficiamento do dregs está no alto teor de álcalis presente na composição química. A reação álcali-sílica (RAS), gerada a partir desses álcalis, foi contornada com a utilização de cimentos com a presença de escória de alto forno e cinza volante em porcentagens adequadas. Portanto, os autores sugerem a utilização combinada do resíduo dregs com adições pozolânicas.

Sendo uma das características principais do resíduo atuar como um fíler, destaca-se o potencial de um estudo de empacotamento. Frente a isso, o presente artigo desenvolve pastas com a substituição de 25% do cimento com composições do resíduo dregs e escória de alto forno. Foi utilizado o método via úmido de Wong e Kwan (2008) e o método analítico de Larrard (1999) para a determinação das proporções de mistura adotadas.

2 METODOLOGIA

2.1 MATERIAIS

Para a confecção das pastas, foram utilizados como materiais finos o resíduo dregs, o cimento CP V-ARI e a escória de alto-forno. O resíduo dregs foi selecionado devido à sua alta geração anual pela indústria de celulose e à necessidade de destinação adequada. O cimento CP V-ARI foi escolhido por não conter adições quimicamente ativas, enquanto a escória de alto-forno foi empregada pelo seu potencial de mitigação da reação álcali-sílica (RAS).

O resíduo utilizado nesta pesquisa foi coletado em uma indústria do Sul do Brasil, demonstrando homogeneidade na composição química ao longo do tempo, conforme relatado por Falcão *et al.* (2024). Para reduzir o tamanho das partículas, o resíduo foi submetido a moagem em moinho de bolas por 2 horas. A composição química dos materiais foi analisada por Fluorescência de Raios-X (FRX), com os resultados detalhados na Tabela 1. As caraterísticas físicas dos finos são apresentadas na Tabela 2.

Tabela 1: composição química dos finos

%	SiO_2	Al_2O_3	TiO_2	Fe_2O_3	MnO	MgO	CaO	Na_2O	K_2O	P_2O_5
CP V-ARI	18,43	3,53	0,24	2,76	0,04	2,80	63,18	-.	0,86	0,12
Dregs	-	0,14	0,17	1,75	0,24	4,05	47,13	5,41	0,11	0,37
Escória de alto forno	30,54	13,03	0,72	3,63	0,41	6,73	44,40	-	0,45	0,09

Tabela 2: características físicas dos materiais utilizados

Propriedade	Dregs	CP V-ARI	Escória de alto forno	Método
Diâmetro médio (mm)	15,25	12,00	13,36	Granulometria a laser – método via úmido com álcool isopropílico
Diâmetro 10% (mm)	29,92	20,83	26,81	
Diâmetro 90% (mm)	3,29	2,50	2,28	
Massa específica (g/cm³)	2,45	3,01	1,12	ABNT NBR 16605:2017

O aditivo utilizado, redutor de água tipo 2, possui massa específica de 1,074 g/cm³, pH de 4,35 e teor de sólidos de 38,37%. A água utilizada é proveniente da concessionária local.

2.2 MÉTODOS

Para determinar a concentração máxima de sólidos, utilizou-se o método de Wong e Kwan (2008). A relação água/finos foi definida pelo *mini-slump test*, selecionando a que apresentou melhor coesão. O teor ótimo de aditivo foi ajustado com incrementos de 0,3%, a partir de 0,2%, até estabilizar a trabalhabilidade. Com esse teor definido, o ensaio de densidade de massa identificou a maior concentração de sólidos e a menor relação de vazios. O método analítico de De Larrard (1999) foi aplicado com base nos resultados obtidos por Wong e Kwan (2008), visando determinar os valores de densidade real e virtual das composições estudadas.

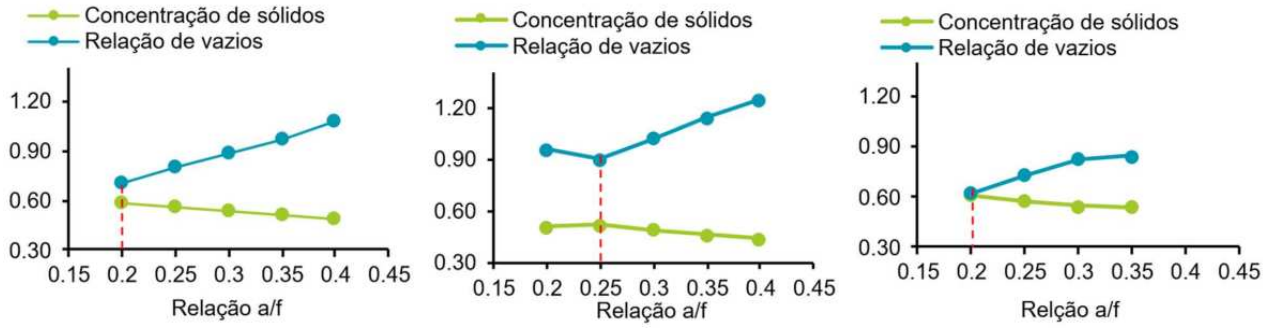
A confecção das pastas seguiu Oliveira (2022), com mistura manual de finos e água por 1 minuto, seguida de 2 minutos em misturador mecânico. O mesmo procedimento foi usado para os fatores preliminares. As misturas foram nomeadas como REF (referência), 5D (5% de dregs, 20% de escória), 10D (10% de dregs, 15% de escória) e 15D (15% de dregs, 10% de escória), com adições em massa, substituindo parcialmente o cimento de 5% a 15%. Foram moldados corpos de prova cilíndricos com dimensões de 2,5 x 5 cm. O procedimento consistiu no preenchimento da fôrma em 3 camadas, em cada camada foram aplicados 15 golpes com soquete.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 EMPACOTAMENTO

Com base no método de Wong e Kwan (2008), foram obtidas concentrações de sólidos variando entre 0,53 e 0,62. Para a relação de vazios, os valores encontrados estão na faixa de 0,62 a 0,90, conforme ilustrado na Figura 1.

Figura 1: Concentração de sólidos e relação de vazios dos finos para diferentes relações água/finos: (a) CP V-ARI, (b) Escória de alto forno e (c) Dregs



A partir dos resultados obtidos, foi aplicado o método analítico de De Larrard (1999). Os dados referentes ao empacotamento virtual e real, assim como as quantidades de materiais utilizados, estão apresentados na Tabela 3. Observa-se que os resultados para todas as misturas são bastante semelhantes. Em relação ao empacotamento real, percebe-se que, à medida que a porcentagem de dregs aumenta, há um aumento nos valores do empacotamento.

Tabela 3: Quantidades dos materiais utilizados, empacotamento virtual e real

CP V - ARI (%)	Dregs (%)	Escória de alto forno (%)	a/c	Aditivo (%)	Empacotamento virtual	Empacotamento real
100	0	0	0,3	0,80	0,293	0,270
75	5	20	0,4	0,65	0,289	0,271
75	10	15	0,4	0,65	0,293	0,275
75	15	10	0,4	0,65	0,298	0,278

3.2 ESTADO FRESCO

Os resultados alcançados no estado fresco para espalhamento e densidade de massa estão apresentados na Tabela 4. No que se refere ao espalhamento, apenas a mistura de referência permitiu a leitura, pois as demais apresentaram baixa trabalhabilidade e não mostraram espalhamento no ensaio de *mini-slump test*.

Quanto à densidade de massa, observa-se uma tendência de redução dos valores conforme o aumento da adição de dregs, com exceção da mistura 15D, que apresentou um resultado superior ao da mistura 10D.

Uma redução na trabalhabilidade das argamassas com a introdução de dregs também foi observada por Menezes (2022), Novais *et al*. (2018) e Oliveira (2022). De acordo com Falcão *et al.* (2025), a redução na trabalhabilidade causada pelo resíduo está diretamente relacionada à morfologia das partículas do dregs, caracterizadas por aglomerados e estruturas irregulares, além do seu tamanho reduzido. He *et al*. (2021) e Khaleel e Abdul Razak (2012) também destacam que a irregularidade da microestrutura e o formato das partículas podem gerar forças de atrito entre elas, o que resulta na redução da fluidez das misturas.

Tabela 4: resultados dos ensaios no estado fresco

Mistura	Espalhamento (mm)	Densidade de massa (g/cm³)
Referência	193,33	235,87
5D	0	225,11
10D	0	218,39
15D	0	221,53

3.3 ESTADO ENDURECIDO

Os resultados dos ensaios de resistência à compressão e densidade de massa, aos 28 dias, estão apresentados na Figura 2. Em relação à resistência à compressão, observa-se um leve incremento conforme há o aumento da porcentagem de adição de dregs. No entanto, é importante destacar que, devido ao desvio padrão, os resultados não apresentam diferenças estatisticamente significativas entre si, conforme indicado pela ANOVA com intervalo de confiança de 95% (Tabela 5). Quanto à densidade de massa, a mistura de referência apresenta uma diferença significativa em comparação com as demais, que são consideradas equivalentes. À medida que a adição de dregs aumenta, a densidade tende a diminuir.

A cinética de hidratação e o empacotamento das partículas são fortemente influenciados pela distribuição granulométrica dos materiais (BENTZ *et al*., 1999). De acordo com Oliveira *et al*. (2024), para maximizar o efeito de empacotamento, é essencial que as adições possuam partículas com dimensão inferior a 75 µm. Contudo, a substituição de parte do cimento por materiais não pozolânicos com partículas maiores geralmente resulta em uma redução na resistência mecânica. Isso ocorre porque os efeitos físicos promovidos pelo empacotamento das partículas podem não ser suficientes para compensar a perda da atividade química proporcionada pelo cimento substituído (ROJO-LÓPEZ *et al*., 2022). Apesar disso, nesse trabalho nota-se um incremento de resistência mecânica na ordem de 21,9% da substituição parcial de 15% do cimento pelo resíduo dregs em comparação com as amostras confeccionadas sem nenhuma adição. A pouca variação positiva já era esperada visto que o resíduo utilizado não é quimicamente ativo e atua apenas como um fíler. Contudo, apesar da pequena variação, os resultados demonstram um impacto positivo, especialmente considerando a redução no consumo de cimento

Figura 2: resultados no estado endurecido (a) resistência à compressão e (b) densidade de massa

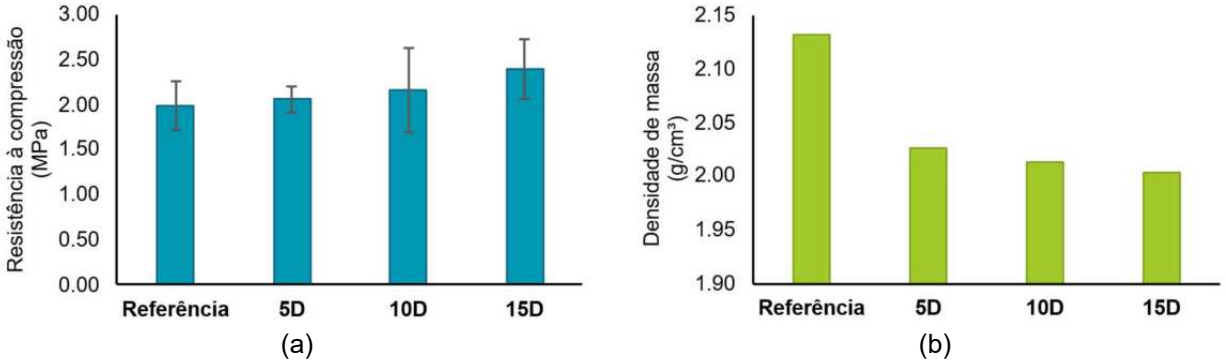
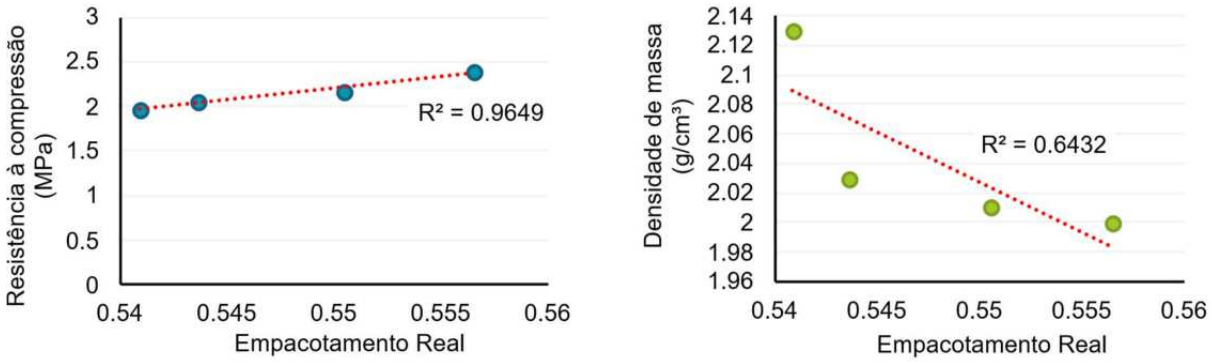


Tabela 5: ANOVA para a resistência à compressão e densidade de massa

Efeito	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Média quadrada	F Test	Probabilidade	Influência significativa
Resistência à compressão	0,52076	3	0,20692	0,5742	0,642814	Não
Error	4,32464	12	0,36039			
Densidade de massa	0,04263	3	0,01421	34,3	0,000004	**Sim**
Error	0,004978	12	0,00041			

A regressão linear (Figura 3) entre o empacotamento real e a resistência à compressão apresenta um elevado coeficiente de determinação (R^2) de 0,96, indicando uma forte correlação. Por outro lado, ao comparar o empacotamento real com a densidade de massa, o coeficiente de determinação da regressão linear é menor, em torno de 0,64, sugerindo uma baixa correlação.

Figura 3: regressão linear do empacotamento real em relação (a) resistência à compressão e (b) densidade de massa



(a) (b)

4 CONCLUSÕES

Com base no programa experimental desenvolvido neste artigo, podem-se estabelecer as seguintes conclusões:

- o resíduo dregs apresenta características físicas e químicas que o tornam adequado como material de enchimento (fíler) em composições cimentícias, contribuindo para o empacotamento e redução de porosidade;
- as misturas contendo dregs apresentaram baixa trabalhabilidade, possivelmente devido à morfologia das partículas, que requer uma maior demanda de água para alcançar a fluidez desejada;
- as composições com a substituição parcial do cimento por escória de alto forno e dregs apresentam valores superiores em relação ao empacotamento real;
- a resistência à compressão apresentou um leve incremento com o aumento da adição de dregs, embora sem diferenças estatisticamente significativas entre as misturas. Esse resultado é relevante, considerando que o dregs substitui o cimento e atua predominantemente como um material de preenchimento na pasta;
- o uso de dregs pode reduzir a necessidade de destinação em aterros e aproveita resíduos industriais, contribuindo para um desempenho ambiental mais sustentável.

REFERÊNCIAS

BENTZ, Dale; GARBOCZI, Edward; HAECKER, Claus; JENSEN, Ole. Effects of cement particle size distribution on performance properties of Portland cement-based materials. **Cement and Concrete Research**, v. 29, n. 10, p. 1663-1671, 1999. DOI: https://doi.org/10.1016/S0008-8846(99)00163-5.

DE LARRARD, F. Concrete mixture proportioning: A Scientific Approach. **Modern Concrete Technology Series**, v. 9. E & FN SPON, London. 1999. DOI: https://doi.org/10.1201/9781482272055.

FALCÃO, Juliane; COSTA, Júlia; MARQUEZAN, Leonardo; MASUERO, Angela; DAL MOLIN, Denise. Incorporation of dregs and grits wastes in mortars: evaluation of mechanical performance and durability. **Ambiente Construído**, Porto Alegre,v. 25, e139047, jan./dez. 2025. DOI: https://www.iba.org/publicacoes.

FALCÃO, Juliane; MELO, Rodrigo; MASUERO, Angela; DAL MOLIN, Denise. Influence of dregs waste on the alkali–silica reaction: a comparative analysis among different types of cement. **Sustainability**, v. 16, n. 19, p. 8610, 2024. DOI: https://doi.org/10.3390/su16198610.

HE, Zhi-hai; HAN, Xu-dong; ZHANG, Meng-yuan; YUAN, Qiang; SHI, Jin-yan; ZHAN, Pei-min. A novel development of green UHPC containing waste concrete powder derived from construction and demolition waste. *Powder Technology*, v. 398, p. 117075, 2022. DOI: https://doi.org/10.1016/j.powtec.2021.117075

INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES. **Relatório Anual IBÁ 2024**. Disponível em: <https://www.iba.org/publicacoes>. Access: 30 Jan. 2025.

KHALEEL, O. R.; ABDUL RAZAK, H. The effect of powder type on the setting time and self-compactability of mortar. **Construction and Building Materials**, v. 36, p. 20-26, 2012. DOI: https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.04.079.

MARTÍNEZ-LAGE, Isabel; VELAY-LIZANCOS, Miriam; VÁZQUEZ-BURGO, Pablo; RIVAS-FERNÁNDEZ, Marcos; VÁZQUEZ-HERRERO, Cristina; RAMÍREZ-RODRÍGUEZ, Antonio; MARTÍN-CANO, Miguel. Concretes and mortars with waste paper industry: biomass ash and dregs. **Journal of Environmental Management**, v. 181, p. 863-873, 2016. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.06.052.

MENEZES, Maurício. Substituição da cal hidratada por dregs, resíduo da indústria de celulose, na confecção de argamassas de múltiplo uso. 2022. 123 f. **Dissertação** (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Campos dos Goytacazes, 2022.

NOVAIS, Rui M.; CARVALHEIRAS, J.; SENFF, L.; LABRINCHA, J. A. Upcycling unexplored dregs and biomass fly ash from the paper and pulp industry in the production of eco-friendly geopolymer mortars: A preliminary assessment. **Construction and Building Materials**, v. 184, p. 464-472, 2018. DOI: https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.07.017.

OLIVEIRA, Dayana; PROENÇA, Melissa; MARQUES FILHO, José; POSSAN, Edna. Mixed construction and demolition powder as a filler to Portland cement: study on packaged pastes. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 24, e131882, jan./dez. 2024. DOI: http://dx.doi.org/10.1590/s1678-86212024000100715.

OLIVEIRA, Yasmine. Uso dos resíduos do processo kraft de celulose – dregs e grits – como adição mineral na produção de matrizes cimentícias. 2022. 113 f. **Dissertação** (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2022. Disponível em: <https://repositorio.ufu.br/handle/123456789/36137>.

OLIVEIRA, Yasmine; COSTA, Eliane; MOTTA, Leila. Uso de dregs e grits em substituição parcial ao cimento: caracterização e resistência mecânica. **Ambiente Construído**, v. 24, dez. 2024. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S167886212024000100907&tlng=pt>.

ROJO-LÓPEZ, Gemma; GONZÁLEZ-FONTEBOA, Belén; MARTÍNEZ-ABELLA, Fernando; GONZÁLEZ-TABOADA, Iris. Rheology, durability, and mechanical performance of sustainable self-compacting concrete with metakaolin and limestone filler. **Case Studies in Construction Materials**, v. 17, p. e01143, 2022. DOI: https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01143.

SANTOS, Rodrigo; ALVARENGA, Rita; MENDES, Beatryz; CARVALHO, José; PEDROTI, Leonardo; AZEVEDO, Afonso. Addition of dregs in mixed mortar: evaluation of physical and mechanical properties. In: **Characterization of Minerals, Metals, and Materials 2018**. Cham: Springer International Publishing, 2018. p. 419-427.DOI: 10.1007/978-3-319-72484-3_44.

WONG, H. H. C.; KWAN, A. K. H. Packing density of cementitious materials: part 2—packing and flow of OPC + PFA + CSF. **Materials and Structures**, vol. 41, no. 4, p. 773–84, 2008. DOI: https://doi.org/10.1617/s11527-007-9281-6.