USO DE ESCÓRIA DE FLUXO DE SOLDAGEM EM SUBSTITUIÇÃO PARCIAL AO CIMENTO PORTLAND EM ARGAMASSAS DE REVESTIMENTO

Lylian Gabriele Carneiro Oliveira, Gabriella Cintra dos Santos, Thiago de Oliveira Ribeiro, Djoille Denner Damm, Fernanda Nepomuceno Costa.
Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, Rua Rui Barbosa, 710, Centro - 44380-000 – Cruz das Almas-BA, Brasil, lyliangabriele@aluno.ufrb.edu.br, gabycintr4@gmail.com, thiagoribeiro@aluno.ufrb.edu.br, djoille@ufrb.edu.br, fernandacosta@ufrb.edu.br.

Resumo
Este trabalho avaliou o potencial da escória de fluxo de soldagem (EFS), resíduo gerado na produção de torres eólicas, como substituto parcial do cimento Portland em argamassas de revestimento. Após beneficiamento, o resíduo foi caracterizado quanto às propriedades físicas, químicas e pozolânicas, sendo produzidas argamassas com substituições de 0%, 6%, 15%, 25% e 35%, em massa, para avaliação das propriedades no estado fresco. A EFS apresentou massa específica de 3,35 g/cm³, diâmetro médio de 22,6 µm e perda de massa térmica de aproximadamente 5,2%, além de baixa atividade pozolânica. O aumento do teor de EFS promoveu elevação do índice de consistência e da densidade de massa das argamassas, acompanhada pela redução do teor de ar incorporado. Por fim, verificou-se que a utilização da EFS em baixos teores de substituição mostra-se viável para a produção de argamassas de revestimento, uma vez que, nessas proporções, não foram observadas alterações significativas nas propriedades avaliadas.
Palavras-chave: Escória de fluxo de soldagem. Argamassa de revestimento. Resíduos industriais.
Área do Conhecimento: Engenharia Civil.

Introdução

A incorporação de materiais cimentícios suplementares em substituição parcial ao clínquer Portland tem sido investigada como estratégia para reduzir as emissões de CO_2 e os impactos ambientais associados à produção de cimento. Essa abordagem contribui para a redução da relação clínquer/ligante, considerando que a produção do clínquer envolve elevado consumo energético e emissões de CO_2 decorrentes principalmente da calcinação do calcário e da queima de combustíveis fósseis (Ali, Saidur e Hossain, 2011). Nesse contexto, a busca por materiais alternativos como substitutos parciais do cimento tem ganhado relevância diante da necessidade de reduzir a intensidade de carbono do setor e dos impactos ambientais associados à produção de cimento (Oliveira, Costa e Motta, 2024).

Entre as alternativas para reduzir os impactos ambientais da produção de cimento, destacam-se os materiais provenientes de resíduos industriais, como cinzas e escórias, que podem contribuir tanto para a redução da pegada de carbono quanto para o desempenho mecânico e a durabilidade dos materiais cimentícios (Oyejobi *et al.,* 2024). Dessa forma, a busca por novas fontes tem direcionado o interesse para resíduos ainda pouco explorados, como a escória de fluxo de soldagem (EFS), gerada durante a soldagem por arco submerso a partir da solidificação do fluxo fundido e produzida em grandes quantidades pela indústria metal-mecânica (Viana *et al.,* 2010). Segundo Castro-Lopes *et al.* (2025), sua composição química, caracterizada pela presença de SiO_2, Al_2O_3, Fe_2O_3 e CaO, associada ao elevado teor de fase amorfa, indica potencial para aplicação como material cimentício suplementar.

A utilização da EFS também pode contribuir para a valorização de resíduos industriais sob a perspectiva da economia circular, ao possibilitar sua reinserção em novos ciclos produtivos e reduzir a geração de rejeitos. Sua incorporação em materiais cimentícios permite transformar um resíduo da indústria metal-mecânica em matéria-prima para a construção civil, promovendo o aproveitamento de recursos e agregando valor ao material (Ghisellini, Cialani e Ulgiati, 2016).

Nesse contexto, considerando a ampla utilização das argamassas de revestimento e a necessidade de ampliar o conhecimento sobre o aproveitamento da EFS, propõe-se investigar sua utilização como substituto parcial do cimento Portland, por meio da caracterização do resíduo e da avaliação de sua influência nas propriedades das argamassas no estado fresco.

Metodologia

A metodologia foi estruturada em quatro etapas principais: (i) coleta e beneficiamento do resíduo; (ii) caracterização dos materiais constituintes; (iii) caracterização da escória do fluxo de soldagem por arco submerso (EFS); e (iv) produção e avaliação das argamassas no estado fresco. Os procedimentos

experimentais foram realizados no Laboratório de Materiais de Construção Civil da Universidade Federal do Recôncavo da Bahia (UFRB), campus de Cruz das Almas - BA.

Inicialmente, o resíduo do fluxo de soldagem por arco submerso foi coletado numa empresa que produz torres eólicas em Camaçari - BA, e transportado para o laboratório. Durante a coleta, foram identificadas duas frações distintas: uma granular, correspondente ao fluxo não fundido durante o processo de soldagem para fabricação das torres eólicas, e outra constituída por fragmentos de escória solidificada, resultantes da fusão do fluxo durante a soldagem. Considerando o objetivo da pesquisa, foi selecionada exclusivamente a fração solidificada de escória, denominada EFS, por corresponder ao resíduo efetivamente gerado pela fusão do fluxo. No laboratório, a EFS foi pesada, seca em estufa, moída em moinho de facas e peneirada em malha de 75 µm. A fração passante correspondeu a 29,1% da massa inicial processada e foi utilizada como material para substituição parcial do cimento.

Figura 1 – Fluxograma do beneficiamento da EFS.



Fonte: Elaborado pelos autores com auxílio de inteligência artificial (2026).

Após o beneficiamento, foram caracterizados os materiais empregados na produção das argamassas. A massa específica do cimento e da EFS foi determinada conforme a NBR 16605 (ABNT, 2017), enquanto o agregado miúdo (areia natural) foi caracterizado quanto à massa específica, conforme a NBR 16916 (ABNT, 2021), massa unitária, conforme a NBR 16972 (ABNT, 2021), e teor de material pulverulento, conforme a NBR 16973 (ABNT, 2021). Para o cimento, também foi determinada a perda ao fogo, segundo o procedimento A da NBR 17086-6 (ABNT, 2023).

A caracterização específica da EFS compreendeu a determinação do teor de umidade, conforme a NBR 17051 (ABNT, 2022), da distribuição granulométrica por difração a laser, utilizando o analisador Bettersizer 2000, e da atividade pozolânica, por meio dos ensaios de índice de atividade pozolânica com cal aos 7 dias e índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias, conforme as NBR 5751 (ABNT, 2015) e NBR 5752 (ABNT, 2014), respectivamente. Complementarmente, foram realizadas análises de termogravimetria (TG), utilizando o analisador SDT Q600 (TA Instruments), e de fluorescência de raios X (FRX), empregando o espectrômetro PANalytical Epsilon3X, visando à identificação das características físico-químicas do resíduo e à avaliação de seu potencial de utilização em matrizes cimentícias.

Posteriormente, foram produzidas cinco composições de argamassa, sendo uma de referência, constituída por 100% de cimento CP V, e quatro com substituição parcial do cimento por EFS nos teores de 6%, 15%, 25% e 35%, em massa. As argamassas foram dosadas no traço 1:6, adotando-se relação água/(cimento + EFS) igual a 1,05. E, por fim, a influência dos diferentes teores de substituição sobre as propriedades das argamassas no estado fresco foi avaliada por meio dos ensaios de índice de consistência, conforme a NBR 13276 (ABNT, 2016), e da densidade de massa e teor de ar incorporado, conforme a NBR 13278 (ABNT, 2005)

Resultados e Discussões

➢ Caracterização dos materiais:

Os dados da caracterização física dos materiais utilizados nas produções das argamassas estão apresentados na Tabela 1. Com base nos resultados apresentados, observa-se que a EFS apresentou massa específica de 3,35 g/cm³, superior à do cimento CP V (3,14 g/cm³) e próxima ao valor de 3,38 g/cm³ obtido por Viana *et al.* (2010) para resíduo de fluxo de soldagem por arco submerso.

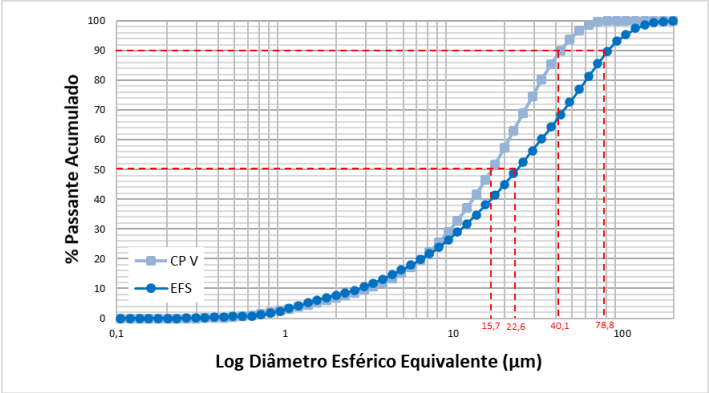
Tabela 1 - Resultado da caracterização física dos materiais.

Propriedades	Areia Natural	CP V - ARI	EFS
Massa específica (g/cm³)	2,62	3,14	3,35
Massa unitária (g/cm³)	1,58	-	-
Teor de material pulverulento (%)	1,60	-	-
Teor de umidade (%)	-	-	0,08
Diâmetro médio D_{50} (µm)	430	15,7	22,6

Fonte: Elaborado pelos autores.

Os resultados da análise granulométrica por difração a laser da EFS e do CP V estão apresentados na Figura 2. As curvas de distribuição granulométrica acumulada indicam uma distribuição contínua de partículas para ambos os materiais, característica típica de materiais pulverulentos empregados em sistemas cimentícios.

Figura 2 - Distribuição granulométrica da EFS e do CP V, obtidas por granulometria a *laser*.



Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

A comparação entre as curvas evidencia que o CP V apresenta distribuição granulométrica mais fina que a EFS. Isso pode ser observado pelo deslocamento da curva do cimento para a esquerda em relação à do resíduo, indicando que, para uma mesma porcentagem passante acumulada, as partículas do cimento possuem menores diâmetros. Em contrapartida, a EFS apresenta predominância de partículas de maior tamanho ao longo de praticamente toda a faixa granulométrica avaliada.

Essa distribuição granulométrica pode influenciar diretamente o comportamento da EFS quando utilizada como substituição parcial do cimento. Em geral, partículas mais grossas apresentam menor área superficial disponível para interação com os produtos de hidratação, o que tende a reduzir sua reatividade e sua contribuição física ao empacotamento das partículas do sistema cimentício.

A Tabela 2 apresenta a composição química da EFS, expressa em teores de óxidos e perda ao fogo (PF), permitindo identificar seus principais constituintes e avaliar sua influência no comportamento do material.

Tabela 2 - Resultado da caracterização química, % em óxidos, da EFS.

CaO	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	MgO	SO_3	TiO_2	K_2O	Outros	PF
16,30	22,30	24,40	2,33	24,43	0,03	0,93	0,43	7,85	1,00

Fonte: Elaborado pelos autores.

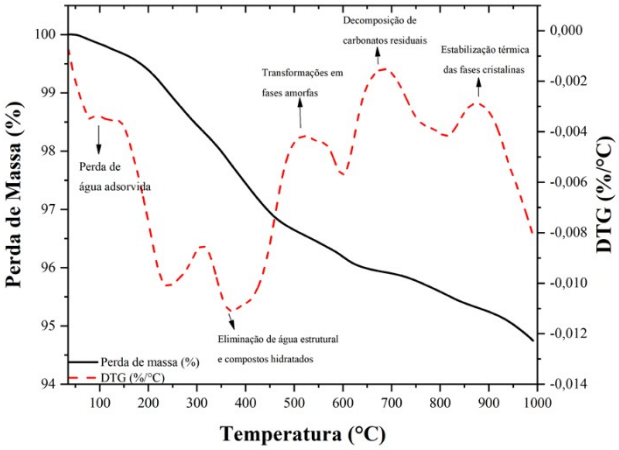
Enquanto o cimento apresenta maior teor de CaO, a EFS possui apenas 16,46% desse óxido, além de maiores teores de SiO_2, Al_2O_3 e MgO. Esses resultados caracterizam a EFS como um material predominantemente aluminossilicático e magnesiano, típico de resíduos de processos metalúrgicos.

Apesar do elevado teor de MgO na EFS (24,68%), a análise por FRX não permite determinar a quantidade de MgO livre. Como os efeitos sobre a estabilidade volumétrica dependem de sua forma mineralógica e distribuição, não é possível associar o teor obtido diretamente à ocorrência de expansão ou fissuração (Song *et al.,* 2021). O resultado pode estar relacionado à composição do fluxo de soldagem, sendo também observado em escórias semelhantes, como a estudada por Campos *et al.* (2024), com 15,68% de MgO.

Dessa forma, a substituição parcial do cimento pode reduzir a disponibilidade de compostos hidráulicos e, em elevados teores ou baixa reatividade pozolânica, comprometer a resistência mecânica. Por outro lado, materiais ricos em SiO_2 e Al_2O_3 podem apresentar atividade pozolânica ou atuar como filler, contribuindo para o refinamento da microestrutura e o melhor empacotamento das partículas (Mehta e Monteiro, 2006; Scrivener, John e Gartner, 2018).

A Figura 3 apresenta as curvas de termogravimetria (TG) e termogravimetria derivada (DTG) da EFS. Observou-se perda de massa de aproximadamente 5,2% entre a temperatura ambiente e 1000 °C, indicando elevada estabilidade térmica do material, compatível com sua exposição a altas temperaturas durante o processo de soldagem por arco submerso.

Figura 3 - Curvas TG e DTG da EFS.



Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

De maneira geral, os resultados obtidos demonstram que a EFS apresenta elevada estabilidade térmica, com perdas de massa relativamente reduzidas e distribuídas em diferentes faixas de temperatura, comportamento compatível com resíduos predominantemente constituídos por fases minerais inorgânicas. No ensaio com cimento Portland aos 28 dias, a argamassa com EFS apresentou resistência à compressão de 9,0 MPa, correspondente a um índice de desempenho de 52%, enquanto a referência atingiu 17,8 MPa. No ensaio com cal aos sete dias, a resistência foi de apenas 2,0 MPa, indicando baixa atividade pozolânica da EFS.

Portanto, a análise conjunta dos resultados apresentados na Tabela 3 evidencia que a EFS não atende aos requisitos necessários para sua classificação como material pozolânico, conforme estabelecido pela NBR 12653 (ABNT, 2014).

Tabela 3 - Comparação entre os requisitos da NBR 12653 e os resultados obtidos para a EFS estudada.

Propriedades	Limite NBR 12653 (Classe E)	EFS	Atendimento
$SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3$ (%)	≥ 50	49,53	Não
SO_3 (%)	≤ 5	0,03	Sim
Teor de umidade (%)	≤ 3	0,08	Sim
Perda ao fogo (%)	≤ 6	1,00	Sim
Na_2O disponível (%)	≤ 1,5	2,44	Não
Índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias (%)	≥ 90	52,00	Não
Atividade pozolânica com cal aos 7 dias (MPa)	≥ 6	2,00	Não

Fonte: Elaborado pelos autores.

Embora a EFS tenha atendido a alguns requisitos químicos, os resultados indicam que o material não apresenta comportamento pozolânico. Assim, sua influência nas argamassas tende a ser predominantemente física, associada à alteração da distribuição granulométrica, à maior massa específica e à redução do volume de ar, não sendo caracterizada como um efeito fíler clássico devido à sua granulometria mais grossa que a do cimento.

- **Ensaios no estado fresco:**

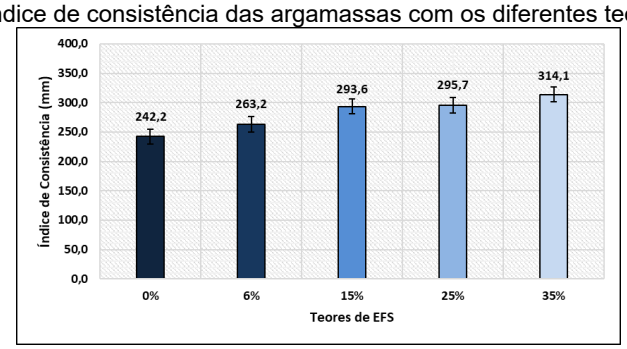
Após a produção, as argamassas com diferentes teores de substituição do cimento Portland por EFS foram imediatamente submetidas aos ensaios no estado fresco a partir do índice de consistência, da densidade de massa e do teor de ar incorporado.

Os resultados do índice de consistência, utilizado para avaliar a trabalhabilidade das misturas, são apresentados na Figura 4.

Esse comportamento pode ser atribuído à menor superfície específica e à baixa reatividade inicial da EFS em relação ao cimento Portland, o que reduz a demanda e o consumo de água da mistura. Consequentemente, maior quantidade de água permanece disponível para a lubrificação das

partículas, favorecendo a mobilidade e o aumento do índice de consistência com a elevação do teor de substituição. Assim, a incorporação da EFS favoreceu a trabalhabilidade das argamassas, proporcionando misturas mais fluidas sem necessidade de aumentar o teor de água.

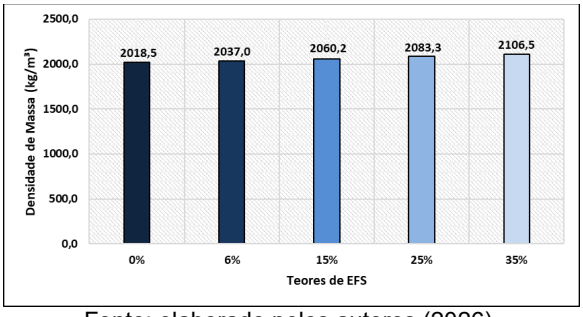
Figura 4 - Índice de consistência das argamassas com os diferentes teores de EFS.



Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

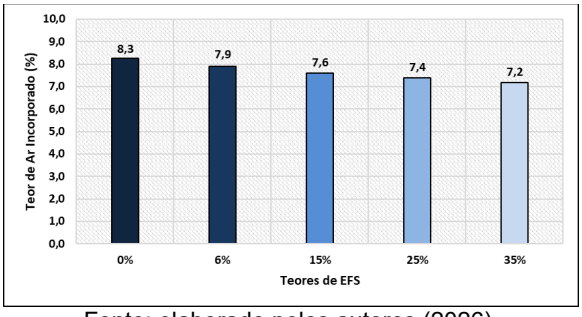
A densidade de massa e o teor de ar das argamassas no estado fresco foram determinados com o objetivo de avaliar a influência da incorporação da EFS sobre essas propriedades, cujos resultados são apresentados nas Figuras 5 e 6, respectivamente.

Figura 5 - Densidade de massa das argamassas com os diferentes teores de EFS.



Fonte: elaborado pelos autores (2026).

Figura 6 - Teor de ar incorporado das argamassas com os diferentes teores de EFS.



Fonte: elaborado pelos autores (2026).

O aumento da densidade de massa pode ser atribuído à maior massa específica da EFS em relação ao CP V e à maior fluidez das misturas, que favorece a acomodação das partículas e reduz o aprisionamento de ar. Esse comportamento indica um empacotamento mais eficiente das partículas, com consequente redução dos vazios e aumento da densidade e homogeneidade das argamassas no estado fresco (De Larrard, 1999). Assim, o comportamento observado para a densidade de massa refletiu diretamente nos resultados de teor de ar incorporado, uma vez que essas propriedades apresentam relação inversamente proporcional.

Além da maior massa específica da EFS, o aumento do índice de consistência favoreceu o rearranjo das partículas e a redução do ar aprisionado, contribuindo para uma estrutura mais densa no estado fresco. Essa tendência também foi observada por Viana (2007), que verificou aumento da densidade e redução do teor de ar em argamassas contendo EFS, indicando que as características físicas do resíduo favorecem um arranjo mais eficiente das partículas.

Conclusão

A EFS apresentou massa específica de 3,35 g/cm³, granulometria mais grossa que a do cimento Portland e elevada estabilidade térmica. Sua composição química foi caracterizada pela predominância de SiO_2, Al_2O_3 e CaO; entretanto, o somatório desses óxidos e os resultados dos ensaios de atividade pozolânica não atenderam aos requisitos estabelecidos pela NBR 12653, indicando comportamento predominantemente inerte e atuação principalmente por efeitos físicos. No estado fresco, a incorporação da EFS promoveu aumento do índice de consistência (242,2 para 314,1 mm), e da densidade de massa (2018,5 para 2106,5 kg/m³), além da redução do teor de ar incorporado (8,3% para 7,2%). Dessa forma, os resultados demonstram que não houve diferença relevante entre os diferentes teores de substituição e a mistura de referência, indicando o potencial da EFS para utilização como substituto parcial do cimento Portland, especialmente em baixos teores.

Referências

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 12653: **Materiais Pozolânicos – Requisitos**. Rio de Janeiro, 2014. 10p.

_____. NBR 13276: **Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação do índice de consistência**. Rio de Janeiro, 2016. 6p.

_____. NBR 13278: **Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da densidade de massa e do teor de ar incorporado**. Rio de Janeiro, 2005. 8p.

_____. NBR 16605: **Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação de massa específica**. Rio de Janeiro, 2017. 8p.

_____. NBR 16973: **Agregados – Determinação do material fino que passa pela peneira de 75 µm por lavagem**. Rio de Janeiro, 2021. 7p.

_____. NBR 16916: **Agregado miúdo – Determinação da densidade e da absorção de água**. Rio de Janeiro, 2021. 11p.

_____. NBR 5751: **Materiais pozolânico – Determinação da atividade pozolânica com cal aos sete dias**. Rio de Janeiro, 2015. 8p.

_____. NBR 5752: **Materiais pozolânico – Determinação do índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias**. Rio de Janeiro, 2014. 8p.

_____. NBR 17051: **Materiais pozolânico – Determinação do teor de umidade**. Rio de Janeiro, 2022. 6p.

_____. NBR 17086-6: **Cimento Portland – Análise química - Parte 6: Determinação da perda ao fogo**. Rio de Janeiro, 2023. 9p.

ALI, M.B.; SAIDUR, R.; HOSSAIN, M.S. **A review on emission analysis in cement industries**. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 15, p. 2252-2261, 2011.

CAMPOS, R. P., PIMENTA, M. M., PARK, J. A., LIMA, G. F. C., VAZ, C. T., BEZERRA, A. C. S. **Escória de fluxo de soldagem como material cimentício suplementar**. In: Encontro Nacional De Tecnologia do Ambiente Construído, v. 20., 2024, Maceió. Anais... Maceió: ANTAC, 2024.

CASTRO-LOPES, S.; RODRIGUES, V. D.; MARDEN, S.; PENA-GARCIA, R.; PADRÓN-HERNÁNDEZ, E.; BERENGUER, R. **Influence of submerged arc welding slag content variation on cementitious materials: A sustainable alternative. Construction and Building Materials**, v. 483, p. 141792, 2025.

DE LARRARD, F. **Concrete Mixture Proportioning: A Scientific Approach**. Boca Raton: CRC Press, 1999. 448 p.

GHISELLINI, P.; CIALANI, C.; ULGIATI, S. **A review on circular economy: the expected transition to a balanced interplay of environmental and economic systems**. Journal of Cleaner Production, v. 114, p. 11–32, 2016.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concrete: microstructure, properties, and materials**. 3. ed. New York: McGraw-Hill, 2006.

OLIVEIRA, Y. S. de; COSTA, E. B. C.; MOTTA, L. A. de C. **Uso de dregs e grits em substituição parcial ao cimento: Caracterização e resistência mecânica**. Ambiente Construído, Porto Alegre, v. 24, e126044, 2024.

OYEJOBI, D. O.; FIROOZI, A. A.; FERNÁNDEZ, D. B.; AVUDAIAPPAN S. **Integrating circular economy principles into concrete technology: Enhancing sustainability through industrial waste utilization**. Results in Engineering, v. 24. p. 102846. 2024.

SCRIVENER, K. L.; JOHN, V. M.; GARTNER, E. M. **Eco-efficient cements: Potential economically viable solutions for a low-CO_2 cement-based materials industry**. Cement and Concrete Research, v. 114, p. 2–26, 2018.

SONG, Q.; SU, J.; NIE, J.; LI. H. **The occurrence of MgO and its influence on properties of clinker and cement: a review**. Construction and Building Materials, v. 293, p. 123494, 2021.

VIANA, C. E. **Escória de fluxo de soldagem como agregado miúdo para a produção de argamassa de múltiplo uso**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Campos dos Goytacazes, 2007.

VIANA, C. E.; DIAS, D. P.; PARANHOS, R. P. R.; HOLANDA, J. N. F. **Influência da incorporação de resíduo de escória de fluxo de soldagem nas propriedades tecnológicas de argamassa de múltiplo uso e cerâmica vermelha para construção civil**. Cerâmica, v. 56, p. 83-90, 2010.

Agradecimentos

O presente trabalho contou com o apoio financeiro do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e com a colaboração das empresas Windar e Massa Fort Concreto, pela disponibilidade dos materiais utilizados na pesquisa.