

PROPRIEDADES MECÂNICAS DE MATERIAL CIMENTANTE OBTIDO A PARTIR DE EGAF, GESSO FGD E CINZA DE CALDEIRA DE BIOMASSA

Data de submissão: 06/10/2023

Data de aceite: 01/12/2023

Alessandra Savazzini dos Reis

lfes, Coordenadoria do Curso técnico em Edificações Vitória-ES
<http://lattes.cnpq.br/4640894239319046>

Desilvia Machado Louzada

lfes, Coordenadoria do Curso técnico em Edificações Vitória-ES
<http://lattes.cnpq.br/2486049677883325>

Kathleen Rodrigues Braz

lfes, Coordenadoria do Curso técnico em Edificações Vitória-ES
<http://lattes.cnpq.br/4133792291628562>

Aline Ferreira Araújo Boone

lfes, Coordenadoria do Curso técnico em Edificações Vitória-ES
<http://lattes.cnpq.br/0130395229419406>

RESUMO: O cimento Portland (CP) está presente em praticamente todas as etapas das obras de construção civil, desde a infraestrutura até a fase de acabamentos. Em 2022, a produção de cimento Portland no Brasil foi de 63,5 milhões de toneladas (SNIC, 2023). Considerando a alta demanda por materiais cimentantes, pesquisas vêm sendo realizadas em busca

do aproveitamento de resíduos como matéria-prima alternativa. Com o objetivo de introduzir os resíduos industriais gerados no Estado do Espírito Santo na produção de materiais cimentantes, a presente pesquisa propôs avaliar a possibilidade de produção de argamassa com escória granulada de alto forno (EGAF), cinza da caldeira de biomassa (CCB) e gesso FGD (Flue Gas Desulfurization), simultaneamente. Para isso foi avaliada a propriedade mecânica de em corpos de prova prismáticos de 40mm x 40mm x 160mm contendo argamassa com diferentes teores dos três resíduos denominadas F1, F2 e F5, além de argamassa com 100% de EGAF. Os resultados mostraram que a formulação F5, contendo 5% de CCB, 85% de EGAF, 5% de gesso FGD alcançou os maiores valores de resistência mecânica, apresentando um valor médio de resistência à compressão de 18,5 MPa, que equivale a 74% da resistência do cimento Portland de classe 25 MPa especificada na norma NBR16697/2018.

PALAVRAS-CHAVE: Escória granulada de alto forno, gesso FGD, cinza de caldeira de biomassa, material cimentante, cimento ecológico.

MECHANICAL PROPERTIES OF CEMENTING MATERIAL OBTAINED FROM GBFS, FGD GYPSUM AND BIOMASS BOILER ASH

ABSTRACT: Portland cement (CP) is present in practically all stages of civil construction work, from infrastructure to the finishing phase. In 2022, Portland cement production in Brazil was 63.5 million tons (SNIC, 2023). Considering the high demand for cementing materials, research has been carried out in search of the use of waste as an alternative raw material. With the aim of introducing industrial waste generated in the State of Espírito Santo into the production of cementing materials, this research proposed to evaluate the possibility of producing mortar with granulated blast furnace slag (GBFS), biomass boiler ash (BBA) and FGD gypsum (Flue Gas Desulfurization), simultaneously. For this purpose, the mechanical properties of prismatic specimens measuring 40mm x 40mm x 160mm were evaluated containing mortar with different contents of the three residues called F1, F2 and F5, in addition to mortar with 100% GBFS. The results showed that formulation F5, containing 5% BBA, 85% GBFS, 5% FGD gypsum achieved the highest mechanical strength values, presenting an average compressive strength value of 18.5 MPa, which is equivalent to 74 % of the strength of Portland cement class 25 MPa specified in standard NBR16697/2018.

KEYWORDS: granulated blast furnace slag, FGD gypsum, biomass boiler ash, cementing material, ecological cement.

1 | INTRODUÇÃO

Na busca pela sustentabilidade nos setores industriais e redução da exploração de recursos naturais, uma alternativa promissora é a produção de novos materiais que aproveitem os resíduos gerados pelas indústrias. No contexto dos materiais cimentantes utilizados na construção civil estão sendo realizadas pesquisas que comprovam a viabilidade técnica de produzi-los a partir de resíduos (TEOREANU et al., 2005; RAUUP-PEREIRA, 2008; BURUBERRI, SEABRA e LABRINCHA, 2015).

Sabe-se que o cimento Portland (CP) está presente em várias etapas da construção, sendo utilizado desde a infraestrutura e supraestrutura até nos sistemas de vedação e de revestimentos. Foi estimado um consumo de cimento Portland no Brasil em 63,5 milhões de toneladas em 2022 (SNIC, 2023), o que enfatiza a necessidade de buscar materiais alternativos cimentantes a partir de resíduos ou que demandem menor energia de produção.

Por outro lado, no Estado do Espírito Santo são gerados resíduos industriais com potencial para utilização na composição de parte da matéria-prima natural do cimento Portland (CP), tais como, resíduos de celulose, resíduo da lapidação de vidro, resíduo de beneficiamento de rochas ornamentais e resíduos da siderurgia, entre outros (CALDAS, 2016; GRILLO, 2019; TEIXEIRA et al., 2020).

Considerando as possibilidades de utilização dos resíduos industriais, o objetivo da pesquisa é verificar o potencial de utilização simultânea de três resíduos gerados no estado do Espírito Santo, sendo eles a escória granulada de alto forno (EGAF), a cinza de caldeira de biomassa (CCB) e o gesso FGD (Full Gas Desulfurization) para que possa ser aplicado

como material cimentante na produção de argamassa.

A EGAF é um subproduto da indústria siderúrgica na produção do gerro gusa, que se forma pela fusão das impurezas do minério de ferro, das cinzas do coque e da cal utilizada, adquirindo caráter cimentante, e que na presença de substâncias alcalinas forma um composto com elevadas resistências, e maior durabilidade em relação ao cimento Portland (RAJESH, 2013; QURESHI, 2014; TORRES-CARRASCO, 2015). No Brasil, a NBR 16697/2018 possibilita a produção do cimento CP III com até 75% de EGAF. Estima-se que sejam gerados cerca de 1800 mil toneladas de EGAF por ano em 3 alto-fornos da siderúrgica Arcelor Mittal-ES localizada no estado do Espírito Santo (ARCELOR MITTAL, 2019) correspondente a cerca de 200 a 300kg/t de ferro gusa produzido.

Já, o gesso FGD é formado a partir da reação química entre o dióxido de enxofre presente nos gases de combustão e o calcário utilizado no processo de dessulfuração de gases (MOHAUPT, 2019) que ocorre nas siderúrgicas. De acordo com IEMA (2015), é um dos principais resíduos da indústria, alcançando uma geração de 25.000 t/ano. WU et al. (2009) ao investigarem o potencial de aplicação do gesso FGD, observaram que a adição de gesso ao cimento supersulfatado contribuiu para o aumento de sua resistência. Liu et al. (2016) estudaram a substituição do gesso natural por vários tipos de gesso e constataram que a resistência à compressão em idades mais avançadas, do cimento belítico com gesso FGD é superior ao cimento com gesso natural.

Caillahua e Moura (2014) afirmaram que o gesso FGD é um excelente aditivo retardador dos tempos de pega podendo substituir o gesso natural para a fabricação do cimento Portland. Em um CP II E-32 com gesso FGD houve um retardo de cerca de uma hora no tempo de pega em comparação ao gesso natural. No que se refere o seu impacto ambiental, de acordo com a norma da ABNT NBR 10004:2004, constataram que o resíduo é: não perigoso e não inerte.

Em Teixeira (2019) o gesso FGD foi utilizado como adição ao concreto, a análise de difração de raios-X demonstrou que o resíduo possui um alto potencial como adição mineral do tipo filler. O preenchimento dos poros da pasta cimentícia com partículas de gesso FGD, que são conhecidas por sua alta finura, foi um dos fatores responsáveis pelo aumento da resistência à compressão nos concretos testados, resultando em uma matriz cimentícia mais densa.

Pang, Sun e Huang (2020) analisaram argamassas que continham gesso FGD, percebendo que a resistência a compressão e a flexão da argamassa contendo 20% do gesso FGD, teve seu ápice de 4,3 MPa aos 28 dias.

Já, a cinza de caldeira de biomassa pode ser gerada a partir da queima das cascas de madeira da indústria de celulose, que é a estudada nesta pesquisa. As cinzas de biomassa apresentam grande potencial pozolânico e alcalino, o que as torna ainda mais valiosas para diversas aplicações. Assis (2022) estudou vários tipos de cinzas, gerados da agroindústria (palha de milho, casca de soja, casca de café, casca de laranja, casca de banana, folha

de bananeira e folha de bambu) e seus potenciais pozolânicos e alcalinos. Os resultados comprovaram que possuem potencial pozolânico e alcalino, sendo possível a utilização na produção de material cimentante. Tosti et al. (2019) pesquisaram a aplicabilidade da cinza de biomassa em argamassas, os resultados mostraram que a cinza pode ser utilizada em argamassas mesmo considerando uma composição variada apresentada pelas cinzas.

Louzada, Sagrillo e Campi (2018) estudaram como material cimentante, pastas compostas de CCB e EGAF, e obtiveram resultados favoráveis em “pasta” composta por 90% de EGAF e 10% de CCB, resultando na capacidade de alcançar uma resistência mecânica de 64% do cimento Portland CP III-25. A combinação de EGAF com a cinza de biomassa rica em cálcio pode produzir um tipo de material cimentante, pois pode alterar a resistência à água de produtos à base de resíduos de gesso (ZHAO et al., 2007). Em busca de um terceiro resíduo a ser adicionado à mistura de EGAF e CCB, Magesk e Sagrillo (2019) estudaram a possibilidade de produzir uma “pasta” a partir da mistura de resíduos CCB e EGAF com o gesso FGD e, observaram que as formulações apresentadas obtidas a partir desse mix apresentaram resultados de resistência à compressão superior as “pastas” feitas com 100% EGAF. A partir disso, foi proposta a pesquisa do material cimentante formado por CCB, EGAF e gesso FGD em argamassas.

2 | MATERIAIS

Para a produção do material cimentante proposto foram utilizados simultaneamente os três resíduos industriais: escória granulada de alto forno (EGAF), cinza de caldeira de biomassa (CCB) e gesso FGD (Full Gas Desulfurization).

A EGAF foi fornecida por uma empresa cimenteira do ES e apresenta granulometria com 0,05% de material retido na peneira ABNT nº 200 (abertura de malha 0,075 mm). O gesso FGD foi cedido por uma siderúrgica e possui tamanho de partículas com 100% delas menores que 0,056 mm (MOHAUPT, 2019). E a CCB foi doada por empresa beneficiadora de celulose e apresenta uma finura de 12,1% de material retido na peneira ABNT nº 200 (abertura de malha 0,075 mm) e pH de 11,4 (MAGESK e SAGRILLO, 2019).

A areia usada foi a “areia normal brasileira” nas frações: grossa (#16), média grossa (#30), média fina (#50) e fina (#100) que é fornecida pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas-IPT-SP.

A Tabela 1, apresenta os resultados da análise química dos três resíduos feita por Fluorescência de Raios-X (FRX), sendo que a CCB apresenta perda ao fogo de 18,43% e o FGD de 6,07%.

Óxidos	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	P ₂ O ₅	SO ₃
EGAF	40,13	34,91	11,29	0,33	7,37	0,34	2,28	0,14	2,21
CCB	23,97	38,21	7,17	2,55	3,60	1,8	0,97	1,21	1,17
FGD	39,48	0,23	0,07	0,10	0,3	0,06	-	0,12	45,4

Tabela 1 - FRX dos resíduos (% em massa)

Fonte: Adaptado de Magesk e Sagrillo (2019).

A análise química revela que EGAF e CCB têm como principais componentes o óxido de cálcio (CaO) e a sílica (SiO₂); e o gesso FGD possui principalmente óxido de cálcio e anidrido sulfúrico (SO₃). O CaO é oriundo da lama de cal e o SO₃ é retirado dos gases de combustão no processo de dessulfuração na siderúrgica (MOHAUPT, 2019). O óxido de cálcio e a sílica são encontrados na composição do cimento Portland e estão presentes nos resíduos. Esse fato sugere um potencial de mistura para a produção de um material cimentício.

3 | METODOLOGIA

Para avaliar a resistência à compressão foram produzidas argamassas de referência com 100% de EGAF e três diferentes formulações com os 3 resíduos em teores de CCB variando entre 5% e 15%, EGAF entre 80 a 100% e o gesso FGD de 5% a 10% se baseando nos estudos de Magesk e Sagrillo (2019). A Tabela 2 apresenta as formulações F1, F2, F5 e 100%EGAF com os teores estipulados para cada um dos resíduos, onde os 3 resíduos representam o “material cimentante” da argamassa, que foi acrescida de areia normalizada IPT nas quatro frações no traço 1:3 (massa) com relação água/cimento de 0,50.

Resíduos (%)	F1	F2	F5	EGAF
CCB	15	10	5	0
EGAF	80	80	85	100
Gesso FGD	5	10	10	0

Tabela 2 - Dosagens das misturas (% em massa)

Fonte: Adaptado de Magesk e Sagrillo (2019).

Para garantir a homogeneidade da mistura dos três resíduos, estes foram previamente misturados com auxílio de um fouet. A partir daí, dosagem, mistura e moldagem seguiram as recomendações da NBR 16738/2019. Foram moldados, para cada traço, 3 corpos de prova prismáticos de seção transversal 40mm x 40mm e 160mm.

Foi considerada massa seca total de resíduos de 450 g (contendo os resíduos nos teores constantes na Tabela 2), 1350 g de areia e 225 g de água. Foram moldados os corpos de prova, desformados em 24h, e depois disso, foram imersos em água para a cura.

Aos 28 dias foi determinada a resistência à tração na flexão dos corpos de prova prismáticos (Figura 3a). O ensaio foi realizado em máquina universal EMIC DL10000, a uma velocidade constante (50±10) N/s de carregamento com distância entre apoios de 100 ± 0,5 mm.

A resistência à tração na flexão ($f_{t,f}$) foi calculada por meio da Equação 1.

$$f_{t,f} = \frac{1,5 \times F \times a}{b^3} \text{ (MPa)} \quad \text{Equação 1}$$

Onde: F=força (N); a=distância entre apoios (mm); b=lado da seção transversal do prisma (mm)

Ao fim do ensaio, os corpos de prova foram divididos ao meio no rompimento (Figura 3b), e com as metades foi determinada a resistência à compressão (Figura 3c). O ensaio foi realizado na EMIC DL10000 com auxílio de duas placas metálicas de 40 mm x 40 mm em contato com as superfícies superior e inferior dos corpos de prova. As forças aplicadas nos corpos de prova foram aumentadas de forma uniforme a uma velocidade de 2400 ± 200 N/s.

A resistência à compressão (f_c) foi calculada por meio da Equação 2.

$$f_c = \frac{F_c}{1600} \text{ (MPa)} \quad \text{Equação 2}$$

Onde: Fc=força (N); 1600=área das placas auxiliares (mm²)

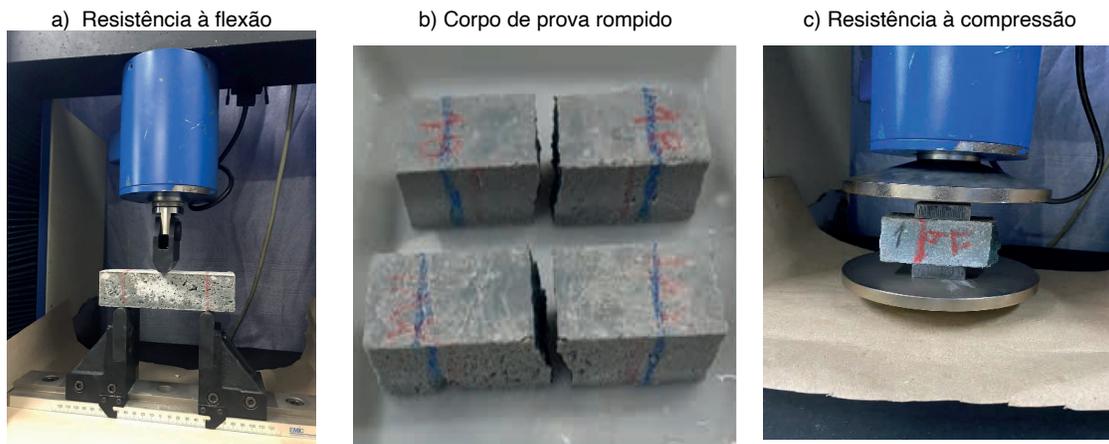


Figura 3 – Detalhes do teste de resistência mecânica

Fonte: Autores (2023).

4 | RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Tabela 3 apresenta os resultados de resistência à tração na flexão dos corpos de prova das formulações F1, F2, F5 e 100%EGAF. O maior valor encontrado de resistência à tração na flexão foi obtido por F5.

	F1	F2	F5	100% EGAF
Resistência à Tração na Flexão (MPa)	3,5	3,1	4,1	0,1
Desvio padrão (MPa)	0,5	0,8	0,7	0,1

Tabela 3 - Resistência à tração na flexão

Fonte: Autores (2023).

A Tabela 4 apresenta os resultados individuais obtidos a partir do ensaio de resistência a compressão aos 28 dias de F1, F2 e F5. Os corpos de prova da EGAF se desfizeram no teste de flexão não sendo possível medir a resistência à compressão.

	cp 1	cp 2	cp 3	cp 4	cp 5	cp 6	Fck Médio(MPa)	SD (MPa)
F1	13,4	11,2	12,4	10,0	12,3	11,5	12,2	0,8
F2	14,6	14,6	15,1	13,8	14,4	14,1	14,4	0,5
F5	19,5	19,9	18,8	18,1	16,9	18	18,5	1,0

Nota: Fck=resistência à compressão; F1, F2, F5= misturas dos resíduos; cp=corpos de prova; SD=desvio padrão

Tabela 4 -Resistência à compressão

Fonte: Autores (2023).

A Figura 4 apresenta os valores médios da resistência à compressão obtidas das misturas tendo como referência o valor normalizado do cimento CP III-25 (NBR 16697/2018). Observa-se que F5 representa 74% do valor da resistência especificada em norma para cimentos de 25 MPa. Observa-se uma melhoria na resistência se comparada aos valores encontrados por Campi e Sagrillo (2018) que alcançaram uma resistência mecânica em pasta contendo CCB e EGAF de 64% da resistência do CP III-25, ou seja, com a adição do FGD aos dois resíduos, a resistência teve um aumento de 10% comparado a pasta de CCB e EGAF. Esse incremento para 74% da resistência do CP III-25 ocorreu, provavelmente, pela adição do gesso FGD que agiu como filler, tornando a argamassa mais densa e por isso com maior resistência mecânica conforme estudado por Teixeira (2019), onde a ação filler do FGD contribuiu para a melhoria da resistência à compressão.



Figura 4 – Resultados médios de resistência à compressão

Fonte: Autores (2023).

5 I CONCLUSÃO

Com base nos resultados obtidos, a formulação F5 demonstrou o melhor desempenho, alcançando 74% da resistência à compressão do cimento CP III-25. Esta evolução se deve, provavelmente, a ação *filler* do FGD que deve ter aumentado a compacidade da argamassa se refletindo em aumento da resistência mecânica. É possível concluir que os três resíduos testados simultaneamente como material cimentante obtido sem queima em argamassa tem propriedades cimentantes.

REFERÊNCIAS

ARCELOR MITTAL. **Escória de alto forno**. Disponível em <https://brasil.arcelormittal.com/produtos-solucoes/coprodutos/coprodutos/escoria-alto-forno>. 2019. Acesso em 27/09/23

ASSIS, L.F. **Caracterização de cinzas de biomassa e potencial de aplicação como material pozolânico ou ativador alcalino**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Estadual Paulista, Ilha solteira, 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 16697: Cimento Portland – Requisitos**. Rio de Janeiro, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 16738: Determinação da resistência à compressão de corpos de prova prismáticos**. Rio de Janeiro, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 10004: Resíduos sólidos - classificação**. Rio de Janeiro, 2004.

BURUBERRI, L. H.; SEABRA, M. P.; LABRINCHA, J. A. Preparation of clinker from paper pulp industry wastes. **Journal of Hazardous Materials**, n. 286, p. 252-260, 2015.

CAMPI, H.M.; SAGRILLO, V.P.D. Relatório IC PJ 4434 - PT N° 5710. **Material Cimentante com Resíduos Kraft e Escória de Alto Forno.** (2017-2018) Ifes-Campus Vitória. Orientadora: Viviana Possamai Della Sagrillo. Edital 2017.

HEMA. **Inventário de Resíduos SOL Coqueria Tubarão S/A.** Cond. N°. 09, LO n° 276/2013. Biênio 2014/2015. Instituto Estadual de Meio Ambiente do Estado do Espírito Santo. 2015.

LIU, B.; WANG, S.; CHEN, Y.; GONG, C.; LU, L. Effect of waste gypsum on the setting and early mechanical properties of belite-C2.75B1.25A3S cement. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, Hungary, mar, 2016.

MAGESK, E. P.; SAGRILLO, V.P.D. Relatório ICPJ 4434 - PT n° 8019. **Desenvolvimento de Materiais Cimentantes sem Clínquer** (2018-2019) Ifes-Campus Vitória. Orientadora: Viviana Possamai Della Sagrillo. Edital 2018.

MOHAUPT, A. F. **Influência do resíduo da dessulfuração de gases da coqueria em tijolos de solo-cimento utilizados na construção civil.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais). PROPEMM. Ifes. 2019.

PANG, M.; SUN, Z.; HUANG, H. Compressive Strength and Durability of FGD Gypsum-Based Mortars Blended with Ground Granulated Blast Furnace Slag. **Materials**. 13 (15), 3383, 13p, 2020. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma13153383>

QURESHI M.D., GHOSH S. Alkali-Activated Blast furnace Slag as a Green Construction Material. **IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering**. (2014) 24-28.

RAUPP-PEREIRA, F. et al. New waste based clinkers: Belite and lime formulations. **cement and concret research**, v. 38, p. 511-521, 2008.

RAJESH, D.V.S.P. et al. Performance of alkali activated slag with various alkali activators. **International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology**, v. 2, p. 378-386, 2013.

SNIC Sindicato Nacional da Industria de Cimento. **Dados do setor.** Disponível no site <http://snic.org.br/numeros-do-setor.php>. Acesso em 27/09/23.

TEOREANU, I.; VOLCEANOV, A.; STOLERIU, S. Non Portland cements and derived materials. **Cement and Concrete Composites**. 2005, v.27, p.650-660.

TOSTI, L.; VAN ZOMEREN, A.; PELS, J. R.; DIJKSTRA, J.J.; COMANS, R. Chemosphere. 2019 May;223:425-437. DOI: 10.1016/j. **Chemosphere**. 2019.02.045. Epub 2019 Feb 11, 2019. PMID: 30784749.

TORRES-CARRASCO, M. et al. Durability of Alkali-Activated Slag Concretes Prepared Using Waste Glass as Alternative Activator. **ACI Materials Journal**, v.112, p. 791-800, nov. 2015.

WU, H.; LU, L.; CHEN, C.; LIU, S.; WANG, H.; CHENG, X. Influence of gypsum on composition and performance of hardened paste of belite-barium. **Advances in Cement Research**, 2009, 21, No. 4, October, 169–174. China.