



AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA À CHAMA DOS COMPÓSITOS COM ESCÓRIA DE ALTO-FORNO

Barbosa S. da S.¹, Dias A. K. B.^{1*}, Ferreira J. G. M.¹, Dos Santos D. J. C.¹,
Estumano D. C.², Rodrigues E. C.³ e Da Costa D. S.⁴

- 1 - Graduando em Engenharia de Materiais, Universidade Federal do Pará, Campus de Ananindeua, Ananindeua, PA, Brasil.
- 2 - Prof. Dr. Vinculado à Faculdade de Ciências Biológicas, Universidade Federal do Pará, Belém, PA, Brasil.
- 3 - Prof. Dr. Vinculado à Faculdade de Engenharia Química, Instituto de Tecnologia, Universidade Federal do Pará, Belém, PA, Brasil.
- 4 - Prof. Dr. Vinculado à Faculdade de Engenharia de Materiais, Universidade Federal do Pará, Campus de Ananindeua, Ananindeua, PA, Brasil.
adias.ufpa@gmail.com

RESUMO

Este estudo investiga o uso da escória de alto forno (EAF) em compósitos de matriz polimérica, avaliando suas propriedades morfológicas, mineralógicas, físicas e de resistência à chama. O processo de fabricação do compósito envolveu a laminação manual em um molde de silicone, sem aplicação de compressão, com a inclusão de 1% de catalisador na resina poliéster ortoftálica. Foram testadas diferentes proporções de EAF (0%, 10%, 20% e 30%) para entender seu impacto na estrutura e desempenho dos compósitos. Os resultados mostraram que a incorporação de EAF reduziu a porosidade e absorção de água dos compósitos, melhorando sua durabilidade e resistência ao fogo. Em particular, o compósito com 30% de EAF apresentou uma significativa redução na taxa de combustão. Este estudo possibilita a produção de um novo material composto utilizando resíduos provenientes de escória de alto forno, oferecendo uma alternativa ambientalmente sustentável para seu destino final.

Palavras-chave: Resíduos, Matriz e Resistência à chama.

INTRODUÇÃO

Segundo a norma ASTM D 3878 (2020), compósitos são materiais formados pela combinação de dois ou mais materiais distintos e insolúveis entre si, resultando em um novo produto com propriedades químicas, mecânicas e termoelétricas diferentes das dos materiais individuais. Para criar um compósito, é necessário ter uma matriz e um reforço, cuja eficácia depende das quantidades e da morfologia do

reforço. As propriedades mecânicas dos compósitos são diretamente influenciadas pelas características das partículas reforçadoras, como tamanho, formato, características de superfície e distribuição do tamanho das partículas.

A escória de alto-forno (EAF) é um subproduto não metálico da indústria siderúrgica, composta principalmente por sílica, cálcio, alumínio, magnésio e oxigênio, representando mais de 95% de sua composição, de acordo com os materiais usados como minério, combustível e fundente. Ela se forma pela combinação das impurezas presentes na carga metálica com outras matérias-primas. Este trabalho visa desenvolver compósitos de matriz de poliéster ortofitálica reforçados com escória de alto-forno em proporções de 0%, 10%, 20% e 30% em massa, com o objetivo de avaliar suas propriedades morfológicas (por MEV), mineralógica, físicas e de resistência a chama.

MATERIAIS E MÉTODOS

Os materiais utilizados para a confecção dos compósitos foram: Escoria de Alto Forno, Resina Poliéster Ortoftálica, Iniciador BUTANOX M-50.

Preparo de Materiais

A Escória de Aciaria Elétrica (EAF) utilizada neste estudo foi originada no município de Marabá-PA, pela empresa Siderúrgica Norte Brasil, e coletada em conformidade com a norma NBR 10007 (ABNT, 2004). Antes de seu uso, o resíduo passou por um prévio processo de beneficiamento, que incluiu secagem em estufa a 105 °C durante 24 horas, para eliminar a umidade e evitar interferências no peneiramento. Após a secagem, o material foi moído em um moinho de bolas com capacidade útil de 21 litros, por 30 minutos, utilizando 1 kg de EAF e esferas de aço inoxidável com diâmetros de 15, 20 e 30 mm. Esse procedimento foi realizado na Usina de Materiais do Laboratório de Engenharia Química da Universidade Federal do Pará (UFPA), Campus Belém (USIMAT/LEQ/UFPA). O peneiramento foi feito manualmente e a seco, utilizando peneiras da série Tyler, com mesh 150 e 200 (aberturas de 105 µm e 75 µm, respectivamente), para avaliar a influência do tamanho das partículas nas propriedades dos compósitos. Não foram identificadas mudanças na coloração do pó de escória nem a presença de resíduos orgânicos no material.

Após o beneficiamento da escória, iniciou-se a fabricação dos compósitos. Para a preparação dos corpos de prova com resíduo de Escória de Alto Forno, utilizou-se resina poliéster cristal, iniciador de Metil-Etil-Cetona e o resíduo, em proporções de 0%, 10%, 20% e 30% em massa. A mistura dos reagentes foi realizada conforme as

recomendações do fabricante, exceto pela inclusão do resíduo, até alcançar a homogeneização, sendo então vertida em moldes e deixada para cura por 72 horas, tempo necessário para o processo completo. Após a cura, os compósitos foram removidos dos moldes de silicone e submetidos a acabamentos superficiais com lixas, seguindo as normas ASTM D 635 para os ensaios resistência a chama.

Caracterização Morfológica

A análise morfológica do resíduo foi realizada com o auxílio de um Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) Tescan Mira3, equipado com um canhão de elétrons do tipo FEG, no Laboratório de Microscopia Eletrônica de Varredura (LME) do Museu Paraense Emílio Goeldi. Antes da análise, o resíduo foi pulverizado, o que permitiu obter informações detalhadas sobre a estrutura e a morfologia das partículas, contribuindo para uma compreensão mais profunda de sua composição e propriedades físicas.

Difratometria de raios X

A caracterização mineralógica da escória de alto-forno (EAF) foi realizada por Difração de Raios X (DRX) para identificar as fases cristalinas presentes no material. A análise foi conduzida no Laboratório de Caracterização Estrutural (LCE) da Universidade Federal do Sul e Sudeste do Pará (UNIFESSPA/Marabá), utilizando um difratômetro de raios X, modelo MINIFLEX 600, fabricado pela Rigaku Corporation. O equipamento estava equipado com um goniômetro (Theta/Theta) e tubos de raios X cerâmicos com ânodo de Cu ($K\alpha = 1,54060 \text{ \AA}$).

A faixa angular de varredura foi estabelecida entre $5,00^\circ$ e $90,00^\circ$ (2θ), com um passo de $0,0200^\circ$ (2θ) e um tempo de aquisição de 1 segundo por passo. Além disso, foram usadas uma fenda divergente de 1° e uma máscara de 10 mm.

Ensaio Físicos

O estudo avaliou a massa específica aparente, a porosidade aparente e a absorção de água de um compósito produzido a partir de resíduo de escória de alto-forno. As normas ASTM D 570, ASTM D 2734 e ASTM D 792 foram seguidas, e os experimentos foram conduzidos no Laboratório de Materiais Porosos e Sintetizados (LAMPS) da UFPA. Para isso, foram utilizados corpos de prova, que passaram por

medições de massa seca (M_s), massa úmida (M_u) e massa submersa (M_i). O procedimento envolveu a secagem dos corpos de prova em estufa a 100 °C por 24 horas para a medição da M_s e a imersão em água destilada por 24 horas para a medição da M_u , enquanto a medição da M_i foi realizada utilizando um aparato que permite medir os corpos de prova submersos. Os cálculos da massa específica aparente seca (MEA), massa específica aparente saturada (PA) e absorção de água (AA) foram efetuados com base em equações específicas.

$$AA = \frac{M_u - M_s}{M_s} \cdot 100 (\%) \quad (1)$$

$$PA = \frac{M_u - M_s}{M_u - M_i} \cdot 100 (\%) \quad (2)$$

$$MEA = \frac{M_s}{M_u - M_i} \cdot \rho_{H_2O} (g/cm^3) \quad (3)$$

Ensaio de Resistência a Chama

O teste de inflamabilidade horizontal foi realizado nas instalações da Usina de Materiais (USIMAT) da Universidade Federal do Pará, seguindo os critérios estabelecidos pela norma ASTM D 635. Para o teste, foram fabricados cinco corpos de prova para cada proporção de resíduos.

Durante o experimento, utilizou-se um dispositivo de estrutura metálica para fixar e sustentar o corpo de prova. A aplicação da chama foi feita com um bico de Bunsen, posicionado a 45° em relação ao corpo de prova.

A taxa de propagação da chama foi calculada utilizando a Equação 4, onde L representa o comprimento útil do corpo de prova em milímetros e t é o tempo em segundos que a chama leva para percorrer esse comprimento. Foram utilizados cinco corpos de prova para cada composição testada.

$$taxa \left(\frac{mm}{min} \right) = \frac{L}{T} \quad (4)$$

O objetivo é classificar o material polimérico com base na sua velocidade de queima, medindo o tempo necessário para a chama, gerada por um bico de Bunsen

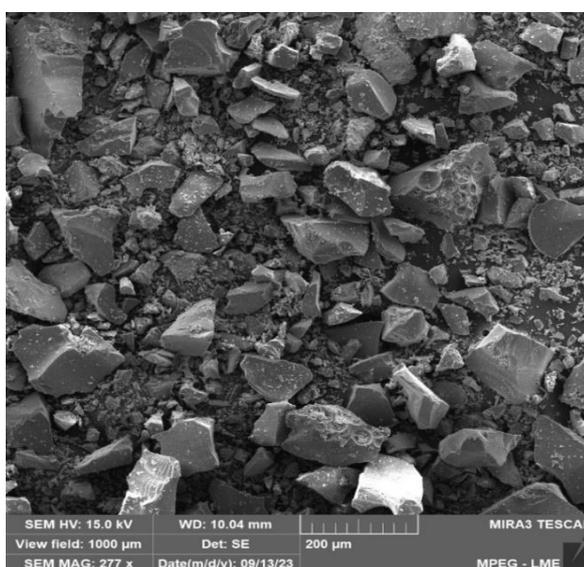
posicionado a um ângulo de 45°, percorrer o material em milímetros por minuto (Coelho, 2022).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Caracterização Morfológica

A Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) mostra a característica morfológica do resíduo da Escória de alto forno, representado pela Figura 1.

Figura 1 - Morfologia do resíduo de Escória de alto forno



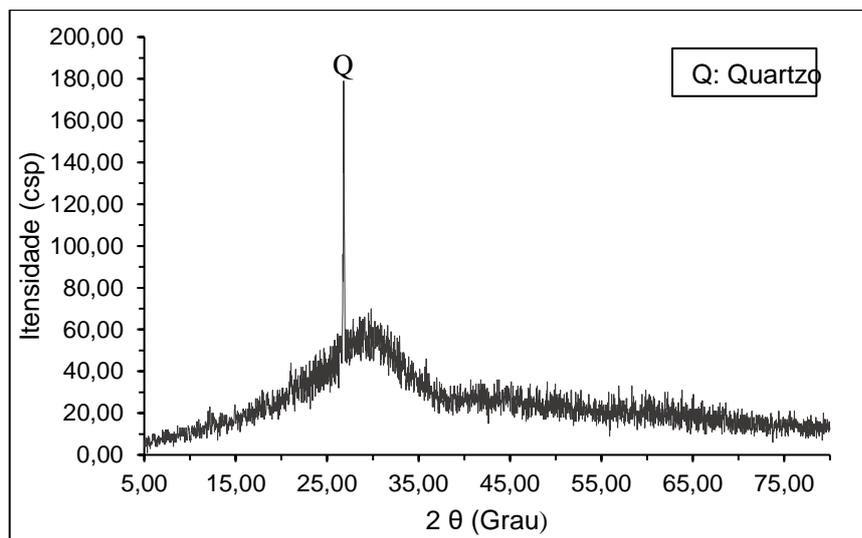
Fonte: Autor 2024

A análise morfológica da escória de alto-forno, conforme mostrado na Figura 1, revela uma variedade de partículas com formas irregulares e tamanhos variados, em concordância com o estudo de Silva *et al.* (2017). Moraes (2022) observou que, após o processo de moagem, as partículas de escória não apresentam uma geometria regular, sendo predominantemente caracterizadas por uma morfologia anômala, com bordas e ângulos distintos, como evidenciado nas micrografias. Os estudos de Chen *et al.* (2022), Radwan *et al.* (2021) e Verma & Dev (2020) também documentaram a irregularidade na forma das partículas de EAF, corroborando com outras análises morfológicas.

Difratometria de raios X

As composições mineralógicas do resíduo de escória de alto-forno foram verificadas por meio da análise de DRX. A Figura 2, apresenta o Difratograma do resíduo.

Figura 2 - Difratograma do resíduo de escória de alto-forno.



Fonte: Autor 2024

A Figura 2 apresenta os principais componentes mineralógicos da escória de alto-forno (EAF). A análise por difração de raios X revelou que o material é predominantemente constituído por quartzo (Q), conforme indicado pela ficha PDF 00-051-2075. Esse resultado está em consonância com os estudos realizados por Moraes (2022). O difratograma também sugere uma predominância de fases amorfas no material, o que pode ser atribuído ao seu rápido resfriamento por jatos de água sob alta pressão após a remoção do resíduo dos altos-fornos. Esse processo de resfriamento rápido não permite a formação de cristais, o que pode aumentar a reatividade do material, conforme destacado por Pimentel *et al.* (2019) e Almeida (2022).

Ensaio físicos

A Tabela 1 apresenta os resultados obtidos por meio dos ensaios de Massa Específica Aparente (MEA), Porosidade Aparente (PA) e Absorção de Água (AA) e da Matriz Plena (MP), dos compósitos de Escoria de alto forno, variando em 0, 10, 20 e 30% em massa.

Tabela 1 - Resultado dos ensaios físicos para cada composição.

Fibra/Proporção	Massa específica aparente (g/cm³)	Porosidade aparente (%)	Absorção de água %
MP	1,180 ± 0,024	2,721 ± 1,199	2,323 ± 1,079
EAF 10%	1,408 ± 0,007	1,319 ± 0,397	0,937 ± 0,285
EAF 20%	1,595 ± 0,026	1,396 ± 0,179	0,876 ± 0,115
EAF 30%	1,776 ± 0,014	1,519 ± 0,316	0,856 ± 0,184

Observou-se um aumento nas massas específicas aparentes dos compósitos à medida que as porcentagens de EAF aumentam, conforme apresentado na Tabela 1, em comparação com a matriz plena. Esse comportamento pode ser explicado pelas diferentes propriedades físicas entre a matriz e o reforço, corroborando a regra da mistura descrita por Callister Júnior e Rethwisch (2021). Segundo essa regra, cada fase contribui para melhorar as propriedades finais do material de acordo com suas características individuais.

Além disso, houve uma redução nos valores de porosidade aparente e absorção de água em comparação com a matriz plena. É evidente que, com o aumento da incorporação de EAF, os valores de porosidade aparente (PA) e absorção de água (AA) diminuem. Tavares (2021) observou que resíduos geralmente têm características hidrofílicas, o que tende a aumentar a absorção de água. No entanto, esse comportamento hidrofílico não foi observado neste ensaio, o que pode ser atribuído à eficiente homogeneização entre o resíduo e a matriz, bem como às características hidrofóbicas da matriz. Além disso, a presença da escória pode ter contribuído para o preenchimento de espaços vazios, aprimoramento da impermeabilidade ou interações químicas no material. Segundo Keles (2011) e Pimentel *et al.* (2019), a escória de alto-forno pode interagir quimicamente com a matriz ou as resinas utilizadas no compósito, melhorando a aderência entre os componentes e, conseqüentemente, reduzindo a porosidade e a absorção de água.

Ensaio de Resistência a Chama

Os resultados dos ensaios de resistência a chama horizontal dos compósitos poliméricos estão expressos na Tabela 2.

Tabela 2 - Ensaio de resistência a chama.

RESÍDUO	TAXA DE PROPAGAÇÃO (mm/min)
MP	36,837 ± (0,269)
EAF 10%	32,272 ± (0,130)
EAF 20%	32,328 ± (0,137)
EAF 30%	23,292 ± (0,257)

Conforme mostrado na Tabela 2, a taxa de queima (mm/min) dos compósitos diminui à medida que aumenta a quantidade de resíduos na matriz polimérica. A matriz de poliéster empregada apresentou uma taxa de propagação de 36,837 mm/min, cerca de 8% abaixo do limite de 40 mm/min da norma ASTM D 635.

Os corpos de prova com 30% de EAF exibiram a menor taxa de queima, com uma redução de aproximadamente 77% em comparação com a regulamentação CONTRAN 498, que estabelece um limite de 100 mm/min para o setor automotivo. Isso pode ser atribuído à presença de minerais como o quartzo, que, conforme Morais (2019), é menos inflamável e ajuda a retardar a propagação das chamas. Da mesma forma, Alencar (2022) observou que óxidos como Fe_2O_3 , $CaCO_3$ e SiO_2 , presentes no material, liberam água estrutural durante a desidratação, contribuindo para a resistência ao fogo.

Além disso, o aumento na quantidade de reforço reduz a quantidade de resina poliéster utilizada, diminuindo a inflamabilidade do compósito e melhorando sua estabilidade térmica. Isso demonstra a importância da formulação adequada dos componentes para alcançar uma resistência ao fogo desejada. Segundo Alencar (2022), partículas inorgânicas de baixa inflamabilidade reduzem o material combustível disponível, explicando a diminuição da taxa de queima com o aumento do teor de partículas.

CONCLUSÕES

Por meio dos resultados obtidos é possível constatar uma boa homogeneização das matérias prima para confecção de corpos de prova utilizando moldes de silicone sem compressão, e um bom acabamento superficial, com poucos defeitos, como bolhas e vazios.

As análises morfológicas e mineralógicas do resíduo revelam características que provavelmente impactaram o desempenho das propriedades físicas e de inflamabilidade dos compósitos fabricados. Entre essas características estão o tamanho e formato das partículas, bem como a presença de minerais como o quartzo.

Os testes físicos indicam que o compósito, com particulados de escória de alto-forno, são menos porosas em comparação com a matriz plena e têm uma massa específica maior.

O teste de inflamabilidade horizontal, conforme a norma ASTM D 635, classificou os materiais como HB. A composição com 30% de EAF apresentou bons resultados, graças às fases mineralógicas da EAF, com taxas de propagação 76,71% abaixo do limite máximo estabelecido pelo CONTRAN.

Diante disso, destaca-se a viabilidade da aplicação do resíduo de escória de alto forno em materiais compósitos, tanto por desempenho, quanto em virtude de agregar valor ao resíduo. Estudos adicionais são fundamentais para estimar diversos tipos de particulados, proporções de incorporações, assim como atender outros parâmetros, tais como o método de produção, o tipo da matriz e condições de endurecimento, no uso de reforço de escória de alto forno.

AGRADECIMENTOS

A Universidade Federal do Pará, a Faculdade de Engenharia de Materiais (FEMat), a Faculdade de Engenharia Química (FEQ), a Usina de Materiais e aos laboratórios de Catálise e Biocatálise, ao Laboratório de Materiais Porosos e Sintetizados e Laboratório de Microscopia Eletrônica de Varredura (LME) Do Museu Paraense Emílio Goeldi.

REFERÊNCIAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D 635**: standard test method for rate of burnin or extent and time of burning of plastics in a horizontal position. Estados Unidos: Annual Book of ASTM Standards, American Society for Testing and Materials, 2018.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D 638**: standard test method for tensile properties of plastics, astm international, west conshohocken, pa, Estados Unidos: Annual Book of ASTM Standards, American Society for Testing and Materials, 2014.

ASTM D 3878-20a, Standard Terminology for Composite Materials, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2020.

ALMEIDA, Bianca Mendes. **Estudo das propriedades mecânicas e microestruturais de materiais cimentícios geopoliméricos produzidos a partir de metacaulim e escória de alto-forno**. 2022. 131 f. Dissertação (Mestrado em Ciências e Engenharia de Materiais) – Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais (PPGCEM), Faculdade de Engenharia de Materiais, Universidade Federal do Pará, Ananindeua, PA, 2022.

CALLISTER JÚNIOR, William D.; RETHWISCH, David G. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**. 10. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2020. 944 p.

CHEN, Yi-Chen *et al.* The study on the properties and TCLP of GGBFS-based heavy-metal-contaminated soil geopolymer. **Crystals**, v. 12, n. 7, p. 900, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/cryst12070900>. Acesso em: 12 fev. 2024.

COELHO, Hellem Cristina Mendonça. **Compósitos poliéster com particulados argilosos: caracterizações mecânicas e flamabilidade**. 2022. 59 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Materiais) – Faculdade de Engenharia de Materiais, Universidade Federal do Pará, Ananindeua, PA, 2022.

CONSELHO NACIONAL DE TRÂNSITO. **Resolução nº 498, de 29 de julho de 2014**. Requisitos aplicáveis aos materiais de revestimento interno do habitáculo de veículos nacionais ou importados. Brasília, DF, 2014.

COSTA, W. F. S.; CHOQUE FERNANDEZ, O. J.; SOUSA, M. S. C. Caracterização de escórias de aciaria e de alto-forno produzidas em usinas ao longo da estrada de ferro Carajás para aplicação industrial. Belo Horizonte: XXVIII Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa, 2019.

DANIEL, Brenda Thayssa Figueira *et al.* Avaliação da altura do leito de sinterização de finos de minério de ferro em um reator vertical de leito fixo para a produção de sínter. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Ciência e tecnologia) - Universidade Federal do Pará, Ananindeua, 2018.

LIMA, A. B. T. Aplicações de cargas minerais em polímeros. Tese de Doutorado, 2006. Universidade de São Paulo.

KELES, Karen Costa. **Influência da basicidade da escória de alto-forno como adição ao concreto**. 2011. 99 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) – Rede Temática em Engenharia de Materiais, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, MG, 2011.

MORAES, Mario Henrique Moreira de. **Estudo de ligante geopolimérico obtido a partir de metacaulim e escória granulada de alto-forno**. 2022. 100 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Pará, Belém, 2022.

PIMENTEL, Maurílio Gomes *et al.* Caracterização da escória de alto-forno proveniente de resíduos industriais visando seu uso na construção civil. **Brazilian Applied Science Review**, v. 3, n. 2, p. 895-907, 2019.

RADWAN, Mohammed K. H. *et al.* Sustainable ternary cement blends with high-volume ground granulated blast furnace slag–fly ash. **Environment, Development and Sustainability**, v. 24, p. 4751-4785, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10668-021-01633-4>. Acesso em: 16 nov. 2023.

SILVA, Maria Célis Pinheiro da *et al.* **Caracterização de escória de alto-forno para fabricação de telhas**. In: Congresso Nacional da Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração, 72., 2017, São Paulo. **Anais [...]**. São Paulo: ABM, 2017.

TAVARES. Janylle Feitosa de Souza. **Estudo da incorporação de resíduo industrial de caulim em compósitos de matriz polimérica**. 2021. 63 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Materiais) – Faculdade de Engenharia de Materiais, Universidade Federal do Pará, Ananindeua, PA, 2021.

VERMA, Manvendra; DEV, Nirendra. Sodium hydroxide effect on the mechanical properties of flyash-slag based geopolymer concrete. **Structural Concrete**, v. 22, p. 368-379, 2020. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1002/suco.202000068>. Acesso em: 16 nov. 2023.

EVALUATION OF THE FLAME RESISTANCE OF COMPOSITES WITH BLAST FURNACE SLAG

ABSTRACT

This study investigates the use of blast furnace slag (EAF) in polymer matrix composites, evaluating its morphological, mineralogical, physical and flame resistance properties. The composite manufacturing process involved manual lamination in a silicone mold, without applying compression, with the inclusion of 1% catalyst in the orthophthalic polyester resin. Different proportions of EAF (0%, 10%, 20% and 30%) were tested to understand their impact on the structure and performance of the composites. The results showed that the incorporation of EAF reduced the porosity and water absorption of the composites, improving their durability and fire resistance. In particular, the composite with 30% EAF showed a significant reduction in the combustion rate. This study makes it possible to produce a new composite material using waste from blast furnace slag, offering an environmentally sustainable alternative for its final destination.

Keywords: Waste, Matrix and Flame resistance.