

Caracterização multianalítica de escória de ferro-níquel da Amazônia para aplicação em materiais cimentícios

Pedro Ferreira da Silva Junior¹ 

Marco Antônio de Oliveira² 

Erika Severino de Miranda³ 

Andrielli Moraes de Oliveira³ 

Sérgio Neves Monteiro⁴ 

Afonso Rangel Garcez de Azevedo⁴ 

Diogo Monteiro Porfírio^{5*} 

Alcebiades Negrão Macedo¹ 

Resumo

Este estudo apresenta uma caracterização físico-química, mineralógica, térmica, morfológica e ambiental da escória de ferro-níquel (FNS) da região amazônica, com foco na avaliação de sua viabilidade como adição em materiais cimentícios. Foram utilizados métodos de granulometria a laser, fluorescência de raios X (FRX), difração de raios X (DRX), espectroscopia Raman, análise térmica (TGA/DTG/DTA), microscopia eletrônica de transmissão (MET) com espectroscopia de energia dispersiva (EDS), além de ensaios ambientais de lixiviação e solubilização. Os resultados mostraram que a FNS é composta majoritariamente por SiO_2 , MgO e Fe_2O_3 , contendo as fases cristalinas predominantes de forsterita (Mg_2SiO_4) e enstatita (MgSiO_3), identificadas por DRX e Raman. A estabilidade térmica foi observada até 1000°C . Os ensaios ambientais classificaram o resíduo como não perigoso e inerte. A morfologia esferoidal das partículas e a presença de fases potencialmente reativas indicam boa compatibilidade com matrizes cimentícias. Dessa forma, a FNS revela-se promissora para aplicação como material cimentício suplementar, promovendo sustentabilidade e valorização de resíduos industriais.

Palavras-chave: Escória de ferro-níquel; Forsterita; Enstatita; Materiais cimentícios; Sustentabilidade.

Multi-analytical characterization of ferro-nickel slag from the Amazon for application in cementitious materials

Abstract

This study presents a physico-chemical, mineralogical, thermal, morphological, and environmental characterization of ferro-nickel slag (FNS) from the Amazon region, focusing on assessing its feasibility as an additive in cementitious materials. The methods employed included laser granulometry, X-ray fluorescence (XRF), X-ray diffraction (XRD), Raman spectroscopy, thermal analysis (TGA/DTG/DTA), transmission electron microscopy (TEM), and energy-dispersive spectroscopy (EDS), as well as environmental leaching and solubility tests. The results showed that FNS is mainly composed of SiO_2 , MgO , and Fe_2O_3 , with predominant crystalline phases of forsterite (Mg_2SiO_4) and enstatite (MgSiO_3), identified through XRD and Raman analyses. Thermal stability was observed up to 1000°C . Environmental tests classified the residue as non-hazardous and inert. The spheroidal morphology of the particles and the presence of potentially reactive phases indicate good compatibility with cementitious matrices. Therefore, FNS proves to be a promising candidate for use as a supplementary cementitious material, promoting sustainability and the valorization of industrial waste.

Keywords: Ferro-nickel slag; Forsterite; Enstatite; Cementitious materials; Sustainability.

¹Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil – PPGEC, Universidade Federal do Pará – UFPA, Belém, PA, Brasil.

²Instituto Federal de Educação Tecnológica do Pará – IFPA, Belém, PA, Brasil.

³Programa de Pós-graduação em Geotecnia, Estruturas e Construção Civil – PPGGECON, Laboratório de Inovação Tecnológica em Construção Civil – LABITECC, Escola de Engenharia Civil e Ambiental – EECA, Universidade Federal de Goiás – UFG, Goiânia, GO, Brasil.

⁴Universidade Estadual do Norte Fluminense – UENF, Campos dos Goytacazes, RJ, Brasil.

⁵Faculdade de Engenharia de Materiais, Instituto Federal de Educação Tecnológica do Pará – IFPA, Belém, PA, Brasil.

*Autor correspondente: mdiogo610@gmail.com

E-mails: pedrojuniorbm@yahoo.com.br; marco.ufpa@gmail.com; erikamiranda@discente.ufg.br; andriellimorais@ufg.br; snevesmonteiro@gmail.com; afonso@uenf.br; anmacedo@ufpa.br



1 Introdução

Resíduos industriais têm sido utilizados na construção civil como materiais cimentícios complementares ou adições minerais ao cimento Portland, argamassas e concretos para proporcionar maior durabilidade, desempenho e comportamento mecânico em materiais cimentícios. Oliveira et al. [1] observaram que esses insumos minerais cimentícios suplementares são geralmente subprodutos industriais, como sílica ativa, cinza volante, escória de alto-forno, cinza de casca de arroz, cinza de bagaço de cana-de-açúcar e resíduo de manganês. Os efeitos dessas adições são conhecidos no meio técnico-científico [2-4] e, essas adições no estado fresco, alteram a reologia da mistura e, no estado endurecido, promovem ações químicas (ação pozolânica) com a pasta de cimento endurecida ou simplesmente têm ação física para preencher poros e vazios, alterando sua microestrutura. Todos esses efeitos costumam ter impacto positivo na impermeabilidade, resistência à compressão final e resistência a ataques químicos em ambientes agressivos, em especial, íons cloreto, CO_2 e sulfatos, devido a alterações na resistência iônica, na solução de poros e na resistividade elétrica superficial aparente, conforme observado por [1], em comparação à matriz sem adições.

Especificamente, a produção de ligas de ferro-níquel, como matéria prima, atende a demanda de outro material que é o aço inoxidável. Aproximadamente 14 toneladas de escória de ferro-níquel (FNS) são produzidas para cada tonelada de ferro-níquel [5].

No ano de 2021, foram extraídas 2,6 milhões de toneladas de minério de níquel no estado do Pará, das quais 71,4 mil toneladas do metal foram refinadas no estado. Isto equivale a quase 21% da produção nacional [6].

No mundo, no ano de 2021 foram produzidas 2,7 milhões de milhares de toneladas [7] de ligas de ferro-níquel, com contribuição do Brasil no ano de aproximadamente 3,7% na produção e reservas minerais. A exploração saprolítica no Brasil ocorre em mina a céu aberto com lavra em encosta e desmonte mecânico. Após, a lavra do minério é depositada em pilhas intermediárias que se destinam para a usina de britagem e depois para usina metalúrgica com tecnologia RKEF – *Rotary Kiln Electric Furnace* (calcinador rotativo e forno elétrico de redução). Durante essa etapa, os componentes indesejados do minério, como óxidos de silício, magnésio, ferro e alumínio reduzem total ou parcialmente e se combinam formando a escória de ferro-níquel (FNS). Ela é um subproduto que gera grande volume e é removido periodicamente do forno [8].

A escória de ferro-níquel (FNS) pode ser classificada em resfriada, por meio de água e por meio do ar. Este resfriamento desempenha um papel decisivo nas composições finais químicas e minerais da FNS. A granulometria da FNS resfriada com água é maior em comparação com a resfriada ao ar, pois o processo a ar, relativamente lento, leva a um menor conteúdo da fase vítrea e isto reduz processos na indústria.

Entretanto, o resfriamento com água consome mais energia, é mais oneroso financeiramente e produz maiores quantidades de minerais amorfos [9]. O tipo de minério, a temperatura de fusão e as condições de resfriamento afetam a microestrutura e as características cristalográficas da FNS, que são críticas para as propriedades macroscópicas deste resíduo [10].

Em termos de composição química, a FNS inclui SiO_2 , MgO , CaO , Fe_2O_3 e Al_2O_3 e minerais cristalinos, como enstatita, forsterita e diopsídio [11,12].

No que tange ao comportamento deletério de expansão, Tomosawa et al. [13] estudaram a reatividade álcali-sílica (ASR) em concretos com cimento e agregados de FNS. Os autores concluíram que a aplicação de cimento com baixo teor de álcalis e a adição de cinzas volantes ou escória granulada de alto-forno foram medidas eficazes para suprimir a reatividade dos agregados de FNS.

Em seguida, Choi e Choi [11] relataram que os agregados de FNS resfriados com água apresentaram expansão excessiva devido a ASR, enquanto os agregados de FNS resfriados ao ar exibiram pouca expansão, semelhante aos corpos de prova de referência (sem agregado de FNS).

Em outros ensaios, Jacobelis [14] estudou o efeito da incorporação de FNS no estado endurecido de pastas e argamassas. A FNS foi incorporada ao clínquer moído com gipsita em teores de 10%, 20% e 30% em massa, avaliando paralelamente a influência da área superficial. O estudo inferiu que argamassas com substituição parcial do clínquer por FNS apresentaram menor consumo de cimento (kg/m^3) por mega Pascal (MPa) de resistência à compressão, chegando ao máximo de 20% de redução no consumo de cimento ou índice de intensidade do cimento (IIC) na amostra com 30% de FNS. Este índice de intensidade do cimento (IIC) é uma adaptação do índice de intensidade de ligante, proposto por Damineli et al. [15]. Matos et al. [16] reforça o conceito de que nem todas as adições industriais são classificadas como pozolânicas.

Novelli [17] estudou a utilização da FNS como material cimentício suplementar em concretos de alto desempenho. Com base nos resultados, ele observou-se que até 10% de substituição do cimento por FNS não houve interferência na resistência mecânica aos 91 dias. Com os níveis de substituição de 20% e 30%, houve redução na resistência à compressão.

Este artigo tem como objetivo caracterizar, sob os aspectos físico-químico e mineralógico, um resíduo industrial de escória de ferro-níquel (FNS), originado na região Amazônica. A pesquisa visa oferecer uma base técnica que subsidie a potencial aplicação desse material como adição mineral na formulação de materiais cimentício com base em resultados de técnicas analíticas térmicas e morfológicas da escória de ferro-níquel (FNS). Tais técnicas e análises são essenciais para a avaliação da viabilidade técnica do uso da FNS, como material cimentício suplementar, além de fornecerem subsídios relevantes para pesquisas futuras voltadas ao seu aproveitamento na construção civil.

2 Materiais e métodos

A FNS utilizada é originária do processo de refino da liga Fe-Ni na unidade operacional de uma mineradora, localizada no município de Ourilândia do Norte, no Estado do Pará, Brasil. A principal atividade desta empresa é a extração de minério níquel.

Inicialmente, a amostra de escória de ferro-níquel (FNS), ilustrada na Figura 1a, foi submetida a um processo de secagem ventilada em estufa a temperatura controlada de 105 °C, durante um período contínuo de 24 horas, com o objetivo de eliminar a umidade residual e padronizar as condições de análises. Após o resfriamento à temperatura ambiente em dessecador, a amostra seca foi processada em um moinho de rotor a martelo, modelo CT-12061, equipamento adequado para cominuição de materiais frágeis e semiduros. O processo de moagem foi conduzido até que a totalidade do material passasse integralmente por uma peneira com abertura de malha de 0,075 mm (75 µm), conforme mostrado na Figura 1b. Esse procedimento visou garantir uma distribuição granulométrica homogênea e adequada às etapas analíticas subsequentes, assegurando reprodutibilidade e precisão nos resultados.

A caracterização granulométrica foi realizada por granulometria a laser, com equipamento *Mastersizer 2000* da *Malvern Panalytical*. A massa específica foi quantificada utilizando um picnômetro com gás hélio.

As análises das amostras foram realizadas por meio de espectrometria de fluorescência de raios X, utilizando-se um espectrômetro sequencial de dispersão por comprimento de onda (WDS), modelo *Axios Minerals*, do fabricante *Panalytical*. O equipamento possui tubo de raios X cerâmico, com ânodo de ródio (Rh) e potência máxima de 2,4 KW. A preparação das pastilhas foi realizada mediante a prensagem de 5 g de amostra com 1,5 g de cera

aglomerante, sob uma carga de 20 toneladas. A aquisição e o processamento dos dados foram efetuados por *software SuperQ Manager*, do mesmo fabricante.

A caracterização mineralógica foi realizada por difração de raios X em difratômetro MPD (PW 3040/60) com anodo de Cobalto (Co K α 1 = 1,78897 Å), razão de 0,02°/min e passo de 0,5 de quantificação de Rietveld e software da *Panalytical X'pert Pro*. As amostras foram secas, cominuídas em um pilão de ágata até que todo o material passasse por uma peneira com malha de 75 µm. O *software Diff'rac Eva* foi utilizado para identificar as fases cristalinas.

A caracterização dos compostos químicos da FNS foi realizada por espectroscopia Raman. As análises foram realizadas no Laboratório do Instituto Militar de Engenharia (IME), utilizando o espectrômetro Raman *Horiba LabRam HR*, acoplado a um microscópio confocal.

As caracterizações ambientais da FNS foram realizadas, segundo as normativas NBR 10004 [18], NBR 10005 [19], NBR 10006 [20] e NBR 10007 [21], por ensaios de lixiviação e solubilidade. A caracterização térmica foi realizada por ensaios de análise termogravimétrica (TGA), análise diferencial termogravimétrica (DTG) e análise de diferença de temperaturas (DTA). As análises foram realizadas com um equipamento modelo *SDT Q600*, em atmosfera inerte de nitrogênio (N₂), com fluxo de 200 ml/min. A massa da amostra teve aproximadamente 10 mg e foi submetida a temperatura de 38 °C a 1000 °C, a uma razão de aquecimento de 5 °C/min.

Por fim, a caracterização morfológica das partículas da escória de ferro-níquel foi efetuada por ensaio de microscopia eletrônica de transmissão (MET), utilizando um microscópio modelo *Jeol JEM-2100* da empresa da *Thermo Scientific*, equipado com espectroscopia de energia dispersiva – EDS.

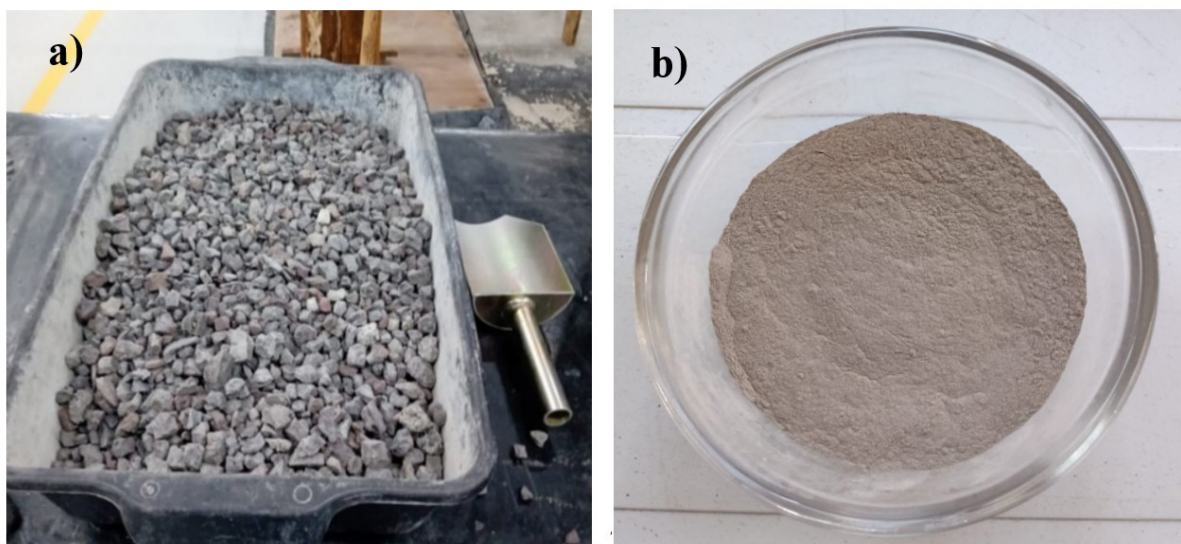


Figura 1. Escória refino da liga Fe-Ni (FNS) utilizada no estudo: (a) amostra sem beneficiamento e (b) beneficiada.

3 Resultados e discussões

A análise de granulometria, Figura 2, fornece uma visão detalhada da distribuição dos tamanhos de partículas de FNS. Os dados mostram que o D10 é de 3,996 μm , o diâmetro médio - D50 é de 31,286 μm e o D90 é de 85,315 μm , revelando uma dispersão física que abrange uma faixa de tamanhos em fração majoritária entre 10 μm e 100 μm . Estes resultados foram semelhantes aos resultados encontrados por Han et al. [22] e Huang et al. [23], com diâmetro de partículas entre 1 μm e 100 μm em escória de ferro-níquel e com maior quantidade entre 10 μm e 100 μm . O resultado obtido no presente artigo indicou que 90% das partículas têm um diâmetro médio menor que 85,315 μm , valor superior ao diâmetro médio dos grãos de cimento e de adições minerais comumente utilizados.

Pagio et al. [24], apresentou a distribuição granulométrica de escória de alto-forno resfriada ao ar com 90% das partículas (D90) de diâmetro inferior a 24,87 μm . Esse valor é significativamente menor (aproximadamente 3,5 vezes menor) que o encontrado neste estudo, indicando que a escória de ferro-níquel dos outros autores apresentou partículas mais finas. Isto pode ser vantajoso para aplicações em matrizes cimentícias, pois materiais com maior finura podem atuar como fíler, densificando a matriz e reduzindo sua porosidade, mas também podem requerer maior demanda de água e/ou aditivo químico na mistura para ajustes de reologia no estado fresco.

Cosme [25], também caracterizou FNS, incluindo análises de granulometria a laser, massa específica e outros parâmetros físicos e químicos. Embora os resultados específicos de granulometria não sejam mencionados diretamente, a pesquisa abordou a viabilidade técnica da escória de ferroníquel como agregado na composição de concreto betuminoso usinado à quente e o material pareceu ser adequado para tais aplicações.

A Tabela 1 exibe os resultados de fluorescência de raios X e massa específica de escória de ferroníquel pesquisada.

Os resultados indicaram uma grande predominância dos óxidos de silício, ferro e magnésio e foram próximos aos obtidos pela literatura [5,9,12,22,23,26].

A quantidade em excesso de óxidos de ferro pode ser explicada pela possível presença de cinzas volantes não cristalinas que também se originam na produção da FNS. O difratograma da escória de ferroníquel está apresentado na Figura 3.

O difratograma obtido confirma a presença de duas fases cristalinas predominantes: a Forsterita (Mg_2SiO_4) e a Enstatita ($\text{Mg}_2\text{Si}_2\text{O}_6$), ambas pertencentes ao grupo dos silicatos de magnésio. Essas fases são características de materiais com alta proporção de óxidos de magnésio (MgO) e sílica (SiO_2). Isto está em consonância com os dados da análise química apresentada na Tabela 1. A composição química reforça a presença dessas fases, uma vez que altos teores de MgO e SiO_2 são precursores típicos da formação de silicatos magnésicos em sistemas termicamente tratados.

A Forsterita é uma fase termodinamicamente estável a altas temperaturas e frequentemente associada à resistência mecânica e a durabilidade em ambientes agressivos, sendo identificada em resíduos industriais como escórias de fornos elétricos ou de siderurgia. Já a Enstatita, um piroxênio ortorrômbico, é formada em ambientes ricos em magnésio e sílica e também contribui para a estabilidade estrutural do material. Sua ocorrência pode indicar processos de cristalização controlada durante o resfriamento da escória ou ainda uma formação intencional em rotas de síntese voltadas à obtenção de materiais cimentícios alternativos.

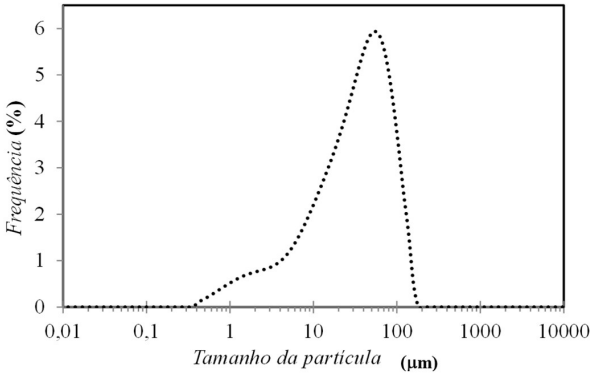


Figura 2. Curva de granulometria a laser da escória de ferro-níquel (FNS).

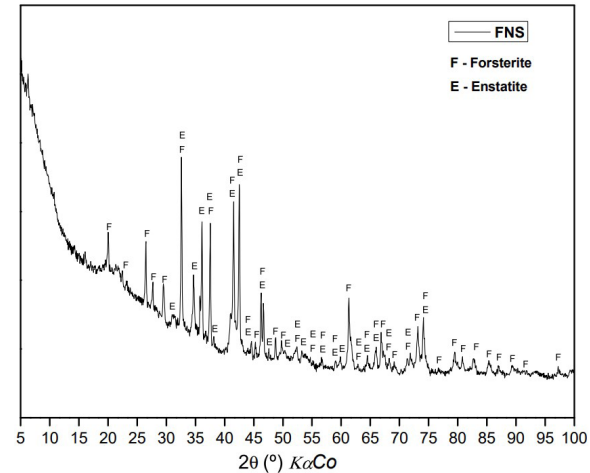


Figura 3. Difratograma da da escória de ferro-níquel (FNS).

Tabela 1. Caracterização química por fluorescência de raios X

Propriedade		Resultado
Densidade (g/cm^3)		3,36
Composição Química (%)	(SiO_2)	38,30
	(Fe_2O_3)	28,90
	(MgO)	27,63
	(Cr_2O_3)	2,29
	(SO_3)	1,13
	(CaO)	0,94
	(MnO)	0,57
		(Ni_2O_3) 0,24

Silva et al. [27], investigou a utilização de escórias contendo Forsterita e Enstatita como adições ativas em cimentos alternativos. Eles destacaram o potencial pozolânico significativo e a melhoria das propriedades mecânicas dos materiais cimentícios com escória.

Os resultados de difratometria de FNS obtidos evidenciam que a FNS é um material cristalino com bandas de material amorfo e bastante sobreposição de picos. Esses resultados são compatíveis com os resultados encontrados por Qi [26] que encontrou picos cristalinos de silicatos de magnésio e ferro em FNS, assim como os de Kim et al. [28] que encontraram 93% de Forsterita em FNS e de Huang et al. [23] e Saha et al. [12] que encontraram apenas fases predominantes de Forsterita e Enstatita em FNS bruto.

A estrutura da Forsterita que é um silicato de magnésio com quantidades em traço de ferro, manganês e níquel, é formada como resultado do metamorfismo de calcários dolomíticos, mármore e rochas magmáticas básicas e é um mineral produto comum em escórias de alto forno. A Enstatita é formada de forma magmática ou metamórfica em temperaturas acima de 700 °C.

Na Figura 4 está apresentado o espectro Raman, obtido da FNS.

As bandas principais podem ser separadas em quatro picos, 675 cm^{-1} , 815 cm^{-1} , 850 cm^{-1} e 1000 cm^{-1} . Segundo Bouasria [2], esse resultado é comparável com uma combinação de espectros Raman de Forsterita, com duplo pico em 818 cm^{-1} e 848 cm^{-1} , seguido de picos antes de 1000 cm^{-1} e, Enstatita, com pico entre 600 cm^{-1} e 700 cm^{-1} e pico entre 1000 cm^{-1} e 1100 cm^{-1} . Bouasria [2] também ressalta que a Forsterita também pode reagir com SiO_2 para ocasionar a Enstatita (MgSiO_3), quando há um excesso de quartzo e sílica. Entretanto não se verificou no espectro Raman a presença de uma fase quantitativa de quartzo ou sílica.

A Figura 5 apresenta os resultados de análises térmicas da escória de ferro-níquel. A Tabela 2 apresenta o comportamento térmico (TGA/DTA) da escória de ferro-níquel, incluindo os eventos térmicos e seus respectivos parâmetros.

Observa-se inicialmente uma perda de 0,5% da massa até 100 °C, atribuída à perda de água adsorvida, acompanhada por um pico exotérmico a 200 °C. O segundo evento, entre 100 °C e 320 °C, resulta em uma redução de 0,3% da massa, geralmente associada à desidroxilação de hidróxidos e decomposição de matéria orgânica. No terceiro evento, entre 320°C e 485 °C, há uma redução de massa de 0,7%, com uma banda endotérmica aproximadamente a temperatura de 430 °C, possivelmente relacionada à

decomposição de fases minerais ou à formação de novas espécies metálicas. Entre 485 °C e 675 °C, ocorre uma nova redução de massa de 0,6%, o que pode estar relacionado à liberação de compostos voláteis ou à alteração de fases intermediárias. Entre 675 °C e 950 °C, verifica-se um aumento de massa de 0,85% com uma banda exotérmica a partir de 950 °C, possivelmente relacionada à cristalização da Forsterita e à formação de Enstatita, fenômenos típicos dessa faixa de temperatura. Isto sugere a estabilização dessas fases cristalinas a temperaturas elevadas.

As Tabelas 3 e 4 registram os resultados de caracterização ambiental do lixiviado de FNS e dos solubilizados, respectivamente, de acordo com a NBR 10005 [19].

De acordo com Kim et al. [28], a FNS contém cromo e outros metais pesados, portanto, haveria limitações no

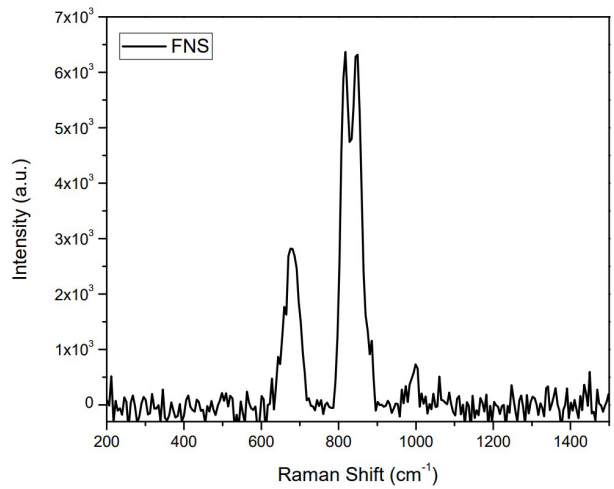


Figura 4. Espectro Raman da escória de ferro-níquel (FNS).

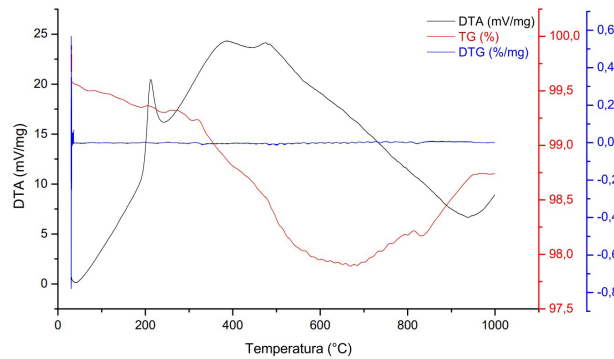


Figura 5. Análise térmica da escória de ferro-níquel (FNS).

Tabela 2. Dados obtidos da análise térmica da escória de ferroníquel (FNS)

Parâmetro	Evento				
	Saída de água adsorvida	Desidroxilação de hidróxido e decomposição de matéria orgânica	Decomposição	Liberação de compostos voláteis	Formação de Enstatita
T (°C)	100	320	485	675	950
Varição de massa (%)	-0,50	-0,30	-0,70	-0,60	+0,85

Tabela 3. Análise do material lixiviado da escória de ferroníquel (FNS)

Parâmetro	Limite máximo no extrato lixiviado (mg/l)	Escória de ferroníquel (FNS) lixiviada	
		Concentração	Ocorrência
Cádmio	< 0,50	< 0,003	Inócuo
Cromo	< 5,00	< 0,007	Inócuo
Prata	< 5,00	< 0,010	Inócuo
Arsênio	< 0,01	< 0,004	Inócuo
Chumbo	< 5,00	< 0,017	Inócuo

Tabela 4. Análise da escória de ferroníquel (FNS) solubilizada

Parâmetro	Limite máximo no extrato solubilizado (mg/l)	Escória de ferroníquel (FNS) solubilizada	
		Concentração	Ocorrência
Cádmio	< 0,005	< 0,001	Inócuo
Cromo	< 0,050	< 0,001	Inócuo
Prata	< 0,050	< 0,001	Inócuo
Arsênio	< 0,010	< 0,001	Inócuo
Chumbo	< 0,200	< 0,001	Inócuo
Alumínio	< 5,000	< 0,01	Inócuo
Ferro	< 0,300	< 0,217	Inócuo
Manganês	< 0,100	< 0,013	Inócuo

uso de FNS se o material cimentício com FNS não fosse certificado para a lixiviação de metais pesados. Segundo a Tabela 3, observou-se que as concentrações de material lixiviado estão abaixo do limite normativo. Portanto, as amostras foram classificadas como não tóxicas e inócuas.

Nas amostras solubilizadas, conforme mostrado na Tabela 4, os valores dos elementos químicos não ultrapassaram o limite máximo considerado seguro para serem classificados como não tóxicos. No entanto, é relevante destacar que, de acordo com a análise química do resíduo, nenhum desses elementos está presente. Isso sugere fortemente que a contaminação da amostra ocorreu durante o processo de preparação para as análises de solubilização, indicando uma possível introdução desses elementos em etapas subsequentes ao processo de coleta ou manipulação da amostra ou que este elemento existe em pouquíssimas quantidades.

A partir dos resultados foi possível classificar a escória de ferro-níquel como material de Classe IIB (Não Perigoso – Inerte) por não possuir nenhum parâmetro na amostra solubilizada em concentrações superiores aos padrões de potabilidade de água.

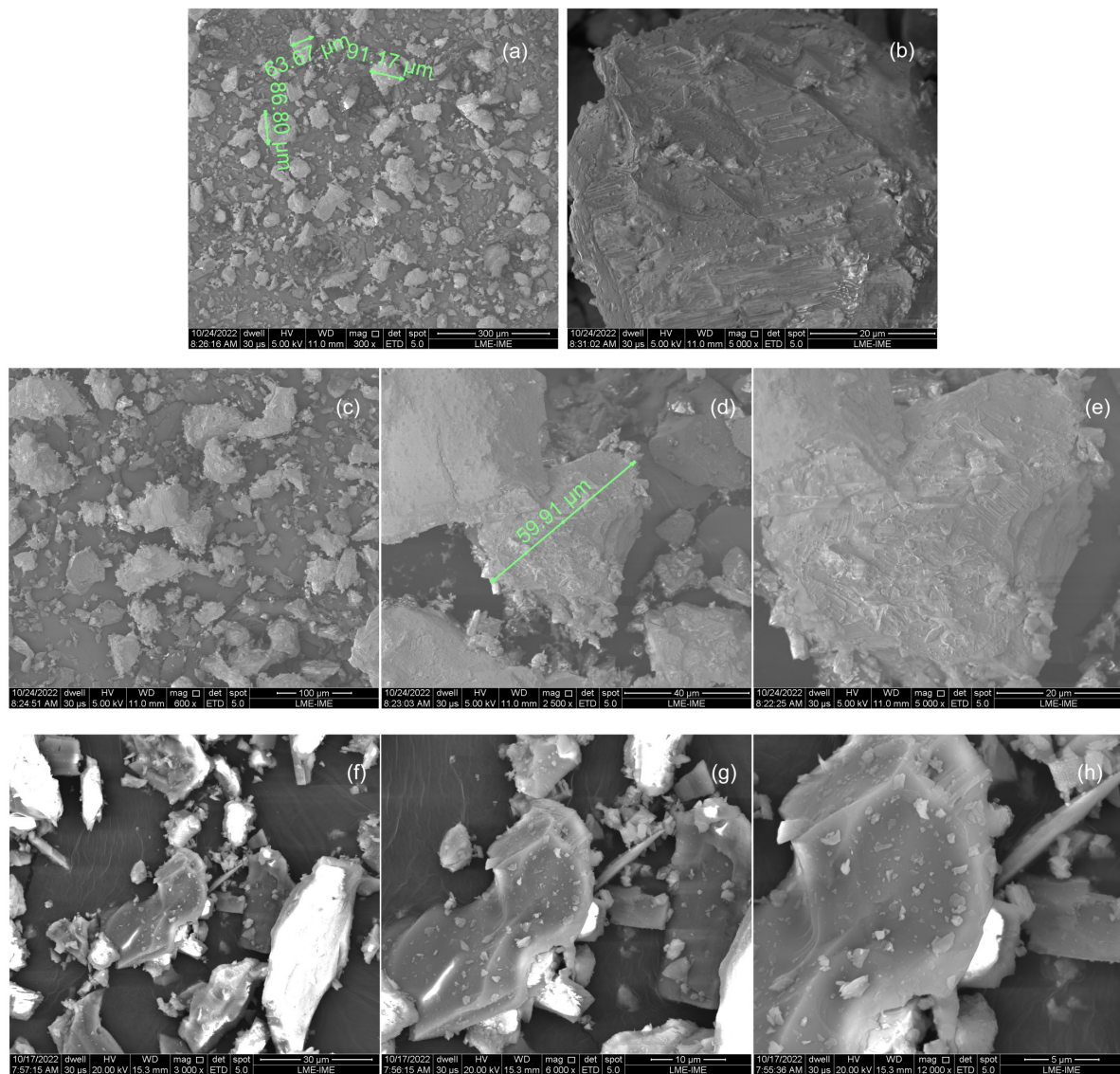
A microscopia eletrônica de transmissão (MET) das amostras de resíduo de escória de ferroníquel revelou que as partículas apresentam um padrão homogêneo, com formas predominantemente esferoidais (Figura 6). As imagens obtidas indicam que as partículas são relativamente bem distribuídas,

sem a formação de lamelas ou estruturas lameliformes, o que sugere uma estrutura mais coesa e compacta do material. Esse comportamento pode estar relacionado ao processo de resfriamento e solidificação da escória que, ao ocorrer de forma controlada, favoreceu a formação de partículas com tamanhos e formas mais regulares.

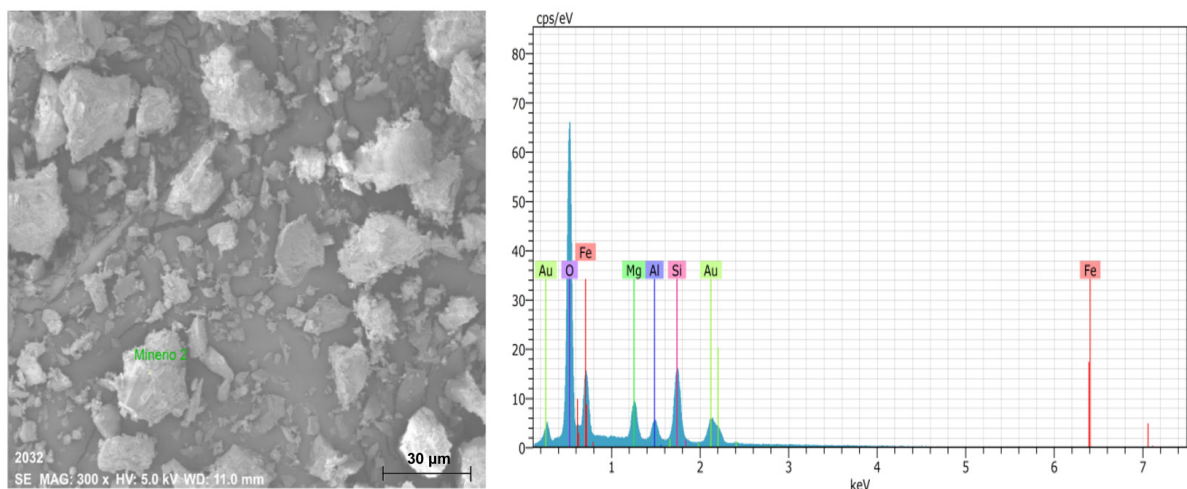
A análise por espectroscopia de dispersão de energia (EDS) mostrou a presença predominante dos elementos Mg, Si, O, Fe e Al na escória de ferroníquel (Figura 7), os quais estão associados à fase estável de forsterita férrica. A forsterita (Mg_2SiO_4) é um silicato de magnésio que, na escória de ferroníquel, pode incorporar ferro (Fe) em sua estrutura cristalina, formando a forsterita férrica.

A presença de alumínio (Al) sugere a formação de fases secundárias, como aluminossilicatos, que podem ocorrer como subprodutos durante o processo de redução no alto forno.

A composição elementar identificada pela EDS é consistente com as características mineralógicas da escória de ferroníquel, que contém grandes quantidades de óxidos de magnésio (MgO) e silício (SiO_2), comuns em materiais gerados em processos metalúrgicos. A forsterita férrica, devido à sua estabilidade e propriedades físicas, é uma das principais fases formadoras da escória, e sua formação está diretamente relacionada ao processo de resfriamento e solidificação da escória após a remoção do ferro.



Figuras 6. Microscopia eletrônica de transmissão (MET) das amostras de escória de ferroníquel (FNS) com ampliação de (a) 300 vezes, (b) 600 vezes, (c) 2500 vezes, (d) 5000 vezes, (d) 5000 vezes, (f) 3000 vezes, (g) 6000 vezes e (h) 12.000 vezes.



Figuras 7. Microscopia eletrônica de transmissão (MET) (ampliação de 300 vezes) e EDS de amostra de ferroníquel (FNS).

4 Conclusões

- O presente estudo realizou uma caracterização multianalítica da escória de ferro-níquel (FNS) proveniente da Amazônia, com o objetivo de avaliar sua viabilidade para aplicação em materiais cimentícios. Os resultados mostraram que a FNS apresenta composição predominante de SiO_2 , MgO e Fe_2O_3 , com identificação clara das fases cristalinas forsterita (Mg_2SiO_4) e enstatita (MgSiO_3), conforme evidenciado pelas análises de DRX e Raman. A estabilidade térmica foi verificada até 1000 °C e os testes ambientais classificaram o material como resíduo inerte e não perigoso.
- Os resultados dos TG/DTG da escória de ferroníquel evidenciam os processos de desidratação, decomposição de compostos orgânicos e transformações mineralógicas, os quais são influenciados pelas condições térmicas aplicadas. As transições térmicas observadas fornecem informações cruciais sobre a estabilidade das fases presentes na escória, além de oferecerem subsídios importantes para a avaliação de sua aplicabilidade em processos industriais, como a recuperação de metais ou seu uso em materiais de construção.
- As bandas principais do Raman indicaram em quatro picos principais, quais sejam, 675 cm^{-1} , 815 cm^{-1} , 850 cm^{-1} e 1000 cm^{-1} , compatíveis com de forsterita e enstatita.
- Além disso, a presença de ferro na estrutura da forsterita pode influenciar as propriedades reológicas e mecânicas da escória, conferindo-lhe características que são relevantes para potenciais aplicações, como a utilização em materiais de construção, onde a escória de ferroníquel pode ser usada como substituto parcial de cimento. A análise elementar fornecida pela EDS é fundamental para a compreensão das fases minerais presentes, contribuindo para o desenvolvimento de estratégias de aproveitamento e mitigação dos impactos ambientais associados à disposição de resíduos desse tipo.
- A análise preliminar da escória de ferro-níquel, mesmo na ausência de ensaios específicos de pozolanicidade e de durabilidade em curto e longo prazo, sugere seu potencial como material complementar em matrizes cimentícias. Essa avaliação promissora se justifica principalmente pela composição química da escória, rica em SiO_2 , que pode contribuir com propriedades desejáveis em ligantes hidráulicos e álcalis ativados.
- A morfologia esferoidal observada nas análises de MET, bem como a distribuição granulométrica, indicam que a FNS possui características físicas compatíveis com a incorporação em matrizes cimentícias. A presença das fases mineralógicas identificadas pode contribuir com reatividade pozolânica e melhoria da microestrutura do concreto. As partículas de FNS apresentam um padrão homogêneo, com formas predominantemente esferoidais. As imagens obtidas indicam que as partículas são relativamente bem distribuídas, sem a formação de lamelas ou estruturas lameliformes, o que sugere uma estrutura mais coesa e compacta do material.
- Mesmo em fase inicial de investigação, os dados obtidos reforçam a viabilidade técnica e ambiental do uso da escória de ferro-níquel em sistemas cimentícios, abrindo caminho para futuras validações experimentais mais específicas.
- Portanto, a escória de ferro-níquel estudada mostra-se tecnicamente interessante para uso como material cimentício suplementar, promovendo ganhos em sustentabilidade ao permitir o reaproveitamento de resíduos industriais e reduzir a demanda por recursos naturais.

Referências

- 1 Oliveira AP, Oliveira AM, Cascudo O. Efeito da sílica ativa e da nanossílica em materiais cimentícios: uma revisão da literatura para futuras pesquisas. *Tecnia*. 2023;8(1):162-175. <http://doi.org/10.56762/tecnica.v8i1.75>.
- 2 Bouasria M. Development and monitoring of the mechanical and hygrothermal performance of low-carbon materials by smart technology [dissertação]. Normandia: Normandie Université; 2022.
- 3 Mehta PK, Monteiro PJM. Concreto: microestrutura, propriedades de materiais. 2. ed. São Paulo: IBRACON; 2014.
- 4 Neville AM. Propriedades do concreto. 5. ed. Porto Alegre: Bookman; 2016.
- 5 Saha AK, Sarker PK. Expansion due to alkali-silica reaction of ferronickel slag fine aggregate in OPC and blended cement mortars. *Construction & Building Materials*. 2016;123:135-142. <http://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.06.144>.

- 6 Agência Nacional de Mineração. Anuário mineral brasileiro 2023. Brasília: ANM; 2023 [acesso em 3 mai. 2025]. Disponível em: https://www.gov.br/anm/pt-br/assuntos/economia-mineral/publicacoes/anuario-mineral/anuario-mineral-brasileiro/amb_2023.pdf
- 7 National Minerals Information Center. Nickel statistics and information. Reston: US Geological Survey; 2022 [acesso em 3 mai. 2025]. Disponível em: <https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2022/mcs2022-nickel.pdf>
- 8 Vignes A. Extractive metallurgy 3. London: ISTE Ltd; John Wiley & Sons; 2011.
- 9 Rahman MA, Sarker PK, Shaikh FUA, Saha AK. Soundness and compressive strength of Portland cement blended with ground granulated ferronickel slag. *Construction & Building Materials*. 2017;140:194-202. <http://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.02.023>.
- 10 Han F, Zhang H, Li Y, Zhang Z. Recycling and comprehensive utilization of ferronickel slag in concrete. *Journal of Cleaner Production*. 2023;412:137633. <http://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.137633>.
- 11 Choi YC, Choi S. Alkali-silica reactivity of cementitious materials using ferro-nickel slag fine aggregates produced in different cooling conditions. *Construction & Building Materials*. 2015;99:279-287. <http://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.09.039>.
- 12 Saha AK, Khan MNN, Sarker PK. Value added utilization of by-product electric furnace ferronickel slag as construction materials: a review. *Resources, Conservation and Recycling*. 2018;134:10-24. <http://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.02.034>.
- 13 Tomosawa F, Nagataki S, Kajiwarra T, Yokoyama M. Alkali-aggregate reactivity of ferronickel-slag aggregate concrete. *ACI Special Publications*. 1997;170:1591-1602. <http://doi.org/10.14359/6893>.
- 14 Jacobelis W No. Escória de ferro-níquel como material cimentício suplementar em substituição parcial ao clínquer Portland em pastas e argamassas de alta resistência [dissertação]. Vitória: Universidade Federal do Espírito Santo; 2024.
- 15 Damineli BL, Kemeid FM, Aguiar PS, John VM. Measuring the eco-efficiency of cement use. *Cement and Concrete Composites*. 2010;32(8):555-562. <http://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2010.07.009>.
- 16 Matos PR, Prudêncio LR Jr, Oliveira AL, Pelisser F, Gleize PJP. Use of porcelain polishing residue as a supplementary cementitious material in self-compacting concrete. *Construction & Building Materials*. 2018;193:623-630. <http://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.10.228>.
- 17 Novelli LG. Avaliação mecânica e de durabilidade de compósitos cimentícios de alto desempenho contendo escória de ferroníquel como adição mineral [dissertação]. Vitória: Universidade Federal do Espírito Santo; 2024.
- 18 Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 10004: resíduos sólidos – classificação. Rio de Janeiro: ABNT; 2004.
- 19 Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 10005: procedimento para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos. Rio de Janeiro: ABNT; 2004.
- 20 Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 10006: procedimento para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos. Rio de Janeiro: ABNT; 2004.
- 21 Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 10007: amostragem de resíduos sólidos. Rio de Janeiro: ABNT; 2004.
- 22 Han F, Zhang H, Pu S, Zhang Z. Hydration heat and kinetics of composite binder containing blast furnace ferronickel slag at different temperatures. *Thermochimica Acta*. 2021;707:178985. <http://doi.org/10.1016/j.tca.2021.178985>.
- 23 Huang Y, Wang Q, Shi M. Characteristics and reactivity of ferronickel slag powder. *Construction & Building Materials*. 2017;156:773-783. <http://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.09.038>.
- 24 Pagio MZ, Carrareto LF, Vieira GL, Magalhães DC. Caracterização de resíduos siderúrgicos visando à aplicação em matrizes cimentícias. *Ambiente Construído*. 2022;22(2):167-186. <http://doi.org/10.1590/s1678-86212022000200599>.
- 25 Cosme J. Utilização de escória de ferroníquel na composição de concreto betuminoso usinado a quente [dissertação]. Ouro Preto: Universidade Federal de Ouro Preto; 2019.
- 26 Qi A, Liu X, Wang Z, Chen Z. Mechanical properties of the concrete containing ferronickel slag and blast furnace slag powder. *Construction & Building Materials*. 2019;231:117120. <http://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117120>.
- 27 Silva TF, Souza EFC, Ferreira GCS, Moreno AL Jr. Propriedades mecânicas de argamassas cimentícias com escória de forno panela e cinza de casca de arroz. In: Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído. XIV Simpósio Brasileiro de Tecnologia das Argamassas; 3-5 Out. 2023; João Pessoa. Porto Alegre: Antac; 2023 [acesso em 3 mai. 2025]. Disponível em: <https://eventos.antac.org.br/index.php/sbta/article/view/4796>.

- 28 Kim H, Lee CH, Ann KY. Feasibility of ferronickel slag powder for cementitious binder in concrete mix. *Construction & Building Materials*. 2019;207:693-705. <http://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.02.166>.

Recebido: 22 Jan. 2025

Aceito: 14 Ago. 2025

Editor responsável:

Sabrina Arcaro 