SBCC 2025
II Simpósio Brasileiro de Ciência do Cimento

ESCÓRIA DE FERRONÍQUEL COMO MATERIAL CIMENTÍCIO SUPLEMENTAR

Ferronickel slag as supplementary cementitious material

Pâmela R. S. Pinheiro
Universidade Federal do Espírito Santo (UFES) | Vitória, ES | pamelaregina.pinheiro@gmail.com

Thiago Almeida Quinquim
Universidade Federal do Espírito Santo (UFES) | Vitória, ES | thiago.quinquim@edu.ufes.br

Rudiele Aparecida Schankoski
Universidade Federal do Espírito Santo (UFES) | Vitória, ES | rudiele@gmail.com

Ronaldo Pilar
Universidade Federal do Espírito Santo (UFES) | Vitória, ES | ronaldo.pilar@ufes.br

Resumo

A indústria cimenteira segue em busca de materiais cimentícios suplementares (MCS) que atendam à crescente demanda por aglomerantes e, simultaneamente, promovam maior sustentabilidade ao setor. Neste estudo, investigou-se o potencial da escória de ferroníquel (EFN), subproduto da redução de ligas de ferroníquel, como MCS. Para isso, foram produzidas argamassas com 25% de substituição, em massa, de cimento Portland por EFN em duas finuras distintas, além do uso de fíler calcário e de uma composição de referência. A reatividade das escórias foi avaliada pelo teste R³, enquanto o desempenho das argamassas foi analisado por ensaios de índice de consistência e resistência à compressão aos 28 dias de idade. Os resultados, validados por testes estatísticos, indicam que o aumento da finura da escória elevou sua reatividade de 146,5 J/g (D_{50}= 6,47 µm) para 224,1 J/g (D_{50}= 4,12 µm). A incorporação de EFN possibilitou a redução do consumo de cimento Portland em até 128,8 kg/m³ de argamassa, sem comprometer a resistência à compressão. Observou-se, ainda, um aumento de até 6,8% no índice de consistência das misturas. Portanto, o uso da EFN apresenta potencial como MCS, oferecendo vantagens técnicas e contribuindo para promoção da economia circular nas indústrias cimenteira e de mineração de níquel.

Palavras-chave: Escória de Ferroníquel; Cimento Portland; Economia circular; Material cimentício suplementar (MCS); Adição Mineral.

ABSTRACT

The cement industry continues to search for supplementary cementitious materials (SCMs) that can meet the increasing demand for binders while improving the sustainability of this industry. This study evaluated the potential of ferronickel slag (FNS), a by-product of ferronickel alloy production, as SCM. To this end, mortars were prepared with a 25% mass replacement of Portland cement by FNS at two different fineness, in addition to the use of limestone filler and a reference composition. The slag reactivity was evaluated using the R³ test, while the mortar performance was analyzed based on the consistency index and the compressive strength after 28 days. The results, validated by statistical analysis, showed that increasing the slag fineness increased the reactivity from 146.5 J/g (D_{50} = 6.47 µm) to 224.1 J/g (D_{50} = 4.12 µm). The incorporation of FNS reduced the consumption of Portland cement by up to 128.8 kg/m³ of mortar without compromising the compressive strength. In addition, an increase in the consistency index of up to 6.8% was observed. These findings highlight the potential of FNS as SCM, offering technical advantages and contributing to promoting the circular economy in both the cement and nickel mining industries.

Keywords: Ferronickel slag; Portland cement; Circular economy; Supplementary Cementitious Material (SCM); Mineral Admixture.

1 INTRODUÇÃO

O uso de materiais cimentícios suplementares (MCS) é uma estratégia consolidada para reduzir as emissões de CO_2 na produção de cimento, com previsão de uma redução de 69% até 2050 (ROADMAP, 2019). A escória granulada de alto-forno (EGAF) é amplamente utilizada no Brasil, mas sua disponibilidade futura pode ser

limitada devido às mudanças nos processos siderúrgicos, além de sua produção nacional estar restrita a algumas cidades, tornando, portanto, essencial a busca por alternativas.

A escória de ferroníquel (EFN) pode ser uma opção viável. Trata-se de um material composto majoritariamente por dióxido de silício, que pode ocorrer na forma amorfa (Wang et al., 2024), e por óxido de magnésio, presente, em geral, como forsterita — uma fase mineral estável de silicato de magnésio (Saha e Sarker, 2016). Os estudos conduzidos por Chi et al. (2023), Huang, Wang e Shi (2017) e Rahman et al. (2017) indicam o potencial da EFN como MCS, com benefícios como manutenção da resistência mecânica, redução da porosidade e aumento da durabilidade, sem relato de efeitos deletérios associados à expansão do MgO. Esse subproduto é gerado em grande escala na produção de ferroníquel em fornos a arco elétrico, com cerca de 14 toneladas de escória por tonelada de liga metálica (Saha e Sarker, 2016). A EFN utilizada neste estudo provém de uma planta em Goiás, com produção anual de aproximadamente 2 milhões de toneladas (Anglo American, 2024). Sem valor comercial, 26 milhões de toneladas desse material podem ser acumuladas até 2031 (Anglo American, 2020). Nesse contexto, este estudo investigou o uso da EFN como substituto parcial do cimento, analisando sua reatividade, impacto na trabalhabilidade e resistência mecânica das misturas cimentícias.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 MATERIAIS

Foi utilizado um cimento Portland de alta resistência inicial (CPV), selecionado por ser o tipo comercialmente disponível com menor teor de adições (teor de clínquer ≥ 90%). Como agregado miúdo nas argamassas, foi utilizada uma areia quartzosa de cava com massa específica de 2,67 g/cm³ e módulo de finura de 1,72. A escória de ferroníquel, proveniente do processo de redução de ligas de níquel em forno a arco elétrico de uma planta localizada em Barro Alto/GO, foi beneficiada em duas frações: EFN, correspondente à fração passante na peneira #200 (75 µm), e EFN-2h, obtida após moagem adicional em moinho de bolas de alta eficiência a 1500 rpm por 2 horas. Como referência de um material de baixa reatividade, utilizou-se um fíler calcário com granulometria semelhante à do CPV. A composição química dos materiais foi obtida por meio de espectrometria de fluorescência de raios-x (FRX), utilizando uma amostra fundida com tetraborato de lítio. As análises foram realizadas em um espectrômetro Malvern Panalytical, modelo Zetium. O ensaio de perda ao fogo foi conduzido a 1.020°C por 2 horas. Os teores obtidos estão apresentados na Tabela 1. A escória de ferroníquel é composta principalmente por SiO_2 (43,8%) e MgO (28,8%), com baixo teor de CaO (0,76%). Em contraste, o fíler calcário e o CPV possuem maior concentração de cálcio, com 52,7% e 56,9% de CaO, respectivamente. As composições granulométricas obtidas por difração a laser e os resultados de reatividade química avaliados pelo ensaio R³ (ASTM C189, 2020) estão apresentados na Figura 1.

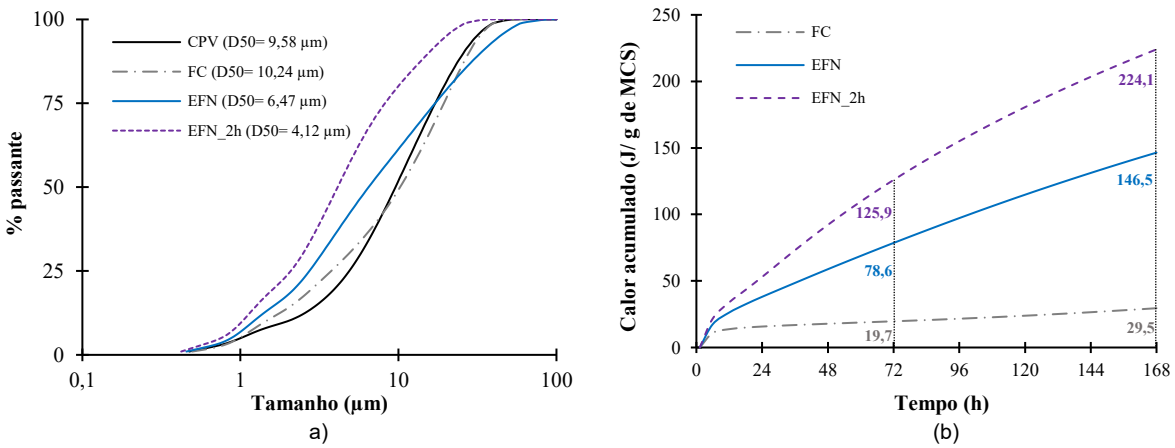
Tabela 1: Composição química .

	SiO_2 (%)	CaO (%)	MgO (%)	Fe_2O_3 (%)	Al_2O_3 (%)	Cr_2O_3 (%)	MnO (%)	TiO_2 (%)	NiO (%)	SO_3 (%)	Na_2O (%)	K_2O (%)	V_2O_5 (%)	PF
EFN	43,8	0,76	28,8	20,2	4,3	1,39	0,37	0,1	0,1	0,07	0,04	0,04	0,08	ganho f.
FC	2,75	52,7	1,59	<0,10	<0,10		<0,10	<0,10			<0,10	<0,10		42,1

PF – Perda ao Fogo

Fonte: Autores (2025).

Figura 1: (a) Composição granulométrica; (b) Resultados de reatividade química obtidos no ensaio R³.



Fonte: Autores (2025).

2.2 MÉTODOS

As argamassas foram preparadas com uma proporção em massa de 1:3:0,48 (cimento: areia: relação água/cimento). Uma mistura de referência contendo apenas CPV foi designada como REF. Outras três argamassas foram formuladas com substituição de 25% da massa de CPV pelos materiais cimentícios suplementares, sendo designadas FC, EFN e EFN_2h.

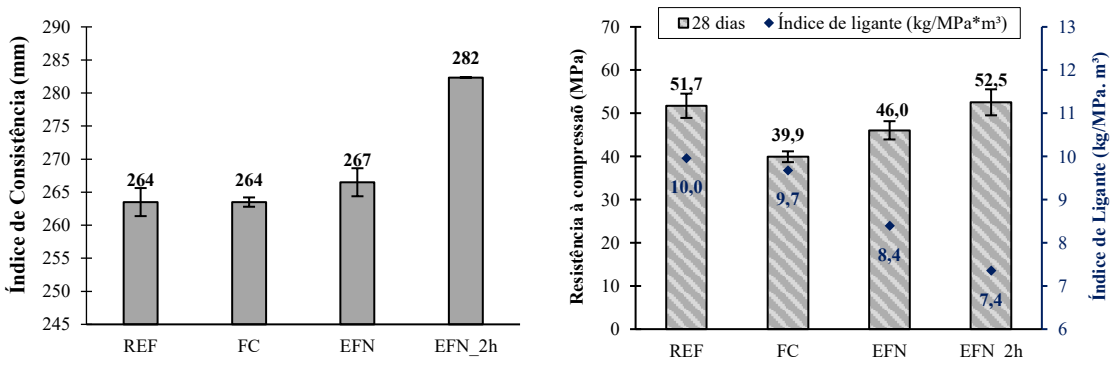
No estado fresco, avaliou-se o índice de consistência das argamassas conforme procedimento da NBR 7215 (ABNT, 2019). Em seguida, foram moldados quatro corpos de prova cilíndricos (5 x 10 cm) de cada mistura para ensaio de resistência à compressão. O processo de cura consistiu em armazenamento inicial em câmara úmida por 24 horas, seguido de imersão em tanque com água e cal até a idade de ruptura, aos 28 dias. Por fim, a análise estatística dos dados de resistência mecânica foi realizada por meio do teste de variância (ANOVA) e do teste de comparação de médias de Tukey, ambos com um nível de significância de $\alpha = 0,05$.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados do ensaio de índice de consistência das argamassas são apresentados na Figura 2-a. Observa-se que a substituição de 25% do CPV por FC e EFN teve pouca influência no diâmetro de espalhamento das argamassas, mantendo os valores idênticos aos da mistura de referência (REF). No entanto, nota-se que independentemente do valor de D_{50} da EFN_2h (4,12 µm) ser 57% menor em relação ao do cimento (9,58 µm), para a argamassa EFN_2h, houve um incremento de 6,8% em relação à argamassa de referência (REF). Esse aumento pode estar associado a melhor distribuição granulométrica da escória moída, resultando em uma maior densidade de empacotamento. Conforme demonstrado por Nanthagopalan et al. (2008), um aumento na densidade de empacotamento pode aumentar a fluidez da mistura e, consequentemente, aumentar o diâmetro de espalhamento das argamassas. Comportamento semelhante foi relatado por Chi et al. (2023), que observaram um incremento de até 80% no diâmetro de abertura de argamassas com 40% de substituição de cimento Portland por escória de ferroníquel.

Os resultados de resistência à compressão das argamassas são apresentados na Figura 2-b. Em relação à mistura de referência (REF) aos 28 dias, a variação percentual dos valores de resistência à compressão das composições contendo FC, EFN e EFN_2h foi de 77%, 91% e 102%, respectivamente. A argamassa EFN apresentou uma resistência 15,3% superior à argamassa com o mesmo teor de substituição por fíler calcário, sugerindo que a escória de ferroníquel não atua apenas como um fíler inerte, mas também contribui quimicamente para o desenvolvimento da resistência. Nesse sentido, Chi et al. (2023) destacam a ação pozolânica da escória, que promove a densificação da matriz e o aumento da resistência. Rahman et al. (2017) relataram que a substituição de 20% do cimento por EFN resultou em misturas com 84% da resistência do grupo de referência aos 28 dias e 95% aos 90 dias. De forma semelhante, Huang, Wang, e Shi (2017) observaram índices de resistência à compressão de até 96% aos 28 dias e 104% aos 90 dias para misturas com 30% de substituição.

Figura 2: (a) Resultados de índice de consistência; (b) Resultados de resistência à compressão aos 28 dias - valores correspondem à média de 4 corpos de prova e as barras de erro, à ± um desvio padrão.



Fonte: Autores (2025).

A moagem aumentou a reatividade da escória, elevando o calor acumulado no ensaio R³ aos 7 dias em 53% (de 146,5 J/g para EFN para 224,1 J/g para EFN_2h) e a resistência à compressão em 14% (de 46,0 MPa

para 52,5 MPa). De acordo com Londono-Zuluaga et al. (2022), uma escória pode ser considerada quimicamente reativa para valores superiores a 98 J/g, com 66% de confiabilidade. Para alcançar 90% de confiabilidade, são recomendados valores acima de 160 J/g. Conforme resultados de ensaios acelerados R³ publicados por Londono-Zuluaga et al. (2022) e Snellings, Suraneni e Skibsted (2023), escórias granuladas de alto-forno e cinzas volantes podem atingir valores da ordem de 470 J/g e 175 J/g, respectivamente, aos 7 dias de hidratação, com temperatura de 40 °C. Nesse contexto, a EFN_2h apresentou reatividade intermediária entre esses dois MCSs, com valor próximo ao das cinzas volantes.

Com base no índice de ligante (Figura 2-b), a substituição do cimento por escória, em ambas as finuras, mostrou-se ambientalmente vantajosa, reduzindo o índice de 10 kg/MPa·m³ (REF) para até 7,4 kg/MPa·m³ (EFN_2h). Em um volume de 1 m³, essa substituição pode reduzir o consumo de até 128,8 kg de cimento sem prejuízo à resistência mecânica, reforçando o potencial da escória de ferroníquel para a produção de cimentos mais sustentáveis.

A análise estatística dos resultados (Tabela 2) confirma a influência do tipo de material cimentício suplementar na resistência à compressão aos 28 dias, com confiabilidade superior a 99%. Com base na comparação entre as médias pelo teste de Tukey, realizou-se o agrupamento das médias, em que os grupos que não compartilham uma mesma letra são estatisticamente diferentes, a um nível de significância de 0,05. As letras atribuídas a REF, FC, EFN e EFN_2h foram A, B, C e A, respectivamente. Assim, com 95% de confiabilidade, a substituição de 25% de CPV por EFN_2h resultou em um desempenho mecânico equivalente ao da mistura de referência aos 28 dias, sendo esse desempenho significativamente superior as misturas FC e EFN.

Tabela 2: Resultados da análise estatística.

ANOVA (α =0,05): Influência do tipo de MCS na resistência à compressão aos 28 dias.							Comparação de médias da resistência à compressão aos 28 dias pelo teste de Tukey (α =0,05).		
							Grupo	Média	Agrupamento[1]
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico	REF	51,7	A
Tipo de MCS	410,37	3	136,79	23,78	2,45E-05	3,49	FC	39,9	B
Dentro	69,02	12	5,75				EFN	46,0	C
Total	479,39	15					EFN_2h	52,5	A
SQ – Soma dos Quadrados; gl- Graus de Liberdade; MQ - Média Quadrada;							[1]Grupo que não compartilham uma letra são significativamente diferentes com 95% de confiabilidade.		

Fonte: Autores (2025).

4 CONCLUSÕES

Com base nos resultados obtidos, conclui-se que o uso de escória de ferroníquel moída como material cimentício suplementar é viável, principalmente em função dos resultados de resistência à compressão das argamassas. A composição contendo até 25% de substituição de CPV por EFN apresentou um aumento no valor de consistência de até 6,8%, mesmo a escória apresentando um valor de D_{50} 57% menor que o observado no CPV. Além disso, a ativação por moagem mostrou-se uma estratégia eficiente para aumentar a reatividade da escória, viabilizando sua aplicação como substituto parcial do cimento sem comprometer a resistência à compressão, visto o ganho de desempenho mecânico de 14%, quando comparado as argamassas EFN e EFN_2h. Dessa forma, o uso da escória de ferroníquel como MCS representa uma alternativa promissora, com potencial para reduzir o consumo de clínquer Portland em composições à base de cimento. Além disso, sua aplicação pode valorizar um subproduto industrial e contribuir para a economia circular nas cadeias produtivas das indústrias cimenteira e de mineração de níquel.

REFERÊNCIAS

ANGLO AMERICAN. Visita técnica à Usina de Barro Alto/GO. **Entrevista concedida ao Eng. Dr. Ronaldo Pilar**. Barro Alto/GO, março, 2024.

ANGLO AMERICAN. **Plano Preliminar de Fechamento da Mina. Barro Alto - GO**, dezembro, 2020.

ASTM C1897-20. (2020). Standard Test Methods for Measuring the Reactivity of Supplementary Cementitious Materials by Isothermal Calorimetry and Bound Water Measurements. **ASTM International**, West Conshohocken, PA, 04(August), 7–11. https://doi.org/10.1520/C1897-20.2

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7215***:* Cimento Portland -Determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro, 2019.

CHI, L. et al. Recycling of ferronickel slag tailing in cementitious materials: Activation and performance. **Science of the Total Environment**, v. 861, p. 160706, 2023.

HUANG, Y.; WANG, Q.; SHI, M. Characteristics and reactivity of ferronickel slag powder. **Construction and Building Materials**, v. 156, p. 773–789, 15 dez. 2017.

LONDONO-ZULUAGA, D. et al. Report of RILEM TC 267-TRM phase 3: validation of the R3 reactivity test across a wide range of materials. **Materials and Structures/Materiaux et Constructions**, v. 55, n. 5, 1 jun. 2022.

NANTHAGOPALAN, P. et al. Investigation on the influence of granular packing on the flow properties of cementitious suspensions. **Cement and Concrete Composites**, v. 30, n. 9, p. 763–768, 2008.

RAHMAN, M. A. et al. Soundness and compressive strength of Portland cement blended with ground granulated ferronickel slag. **Construction and Building Materials**, v. 140, p. 194–202, 1 jun. 2017.

SNELLINGS, R.; SURANENI, P.; SKIBSTED, J. Future and emerging supplementary cementitious materials. **Cement and Concrete Research**, v. 171, p. 107199, 1 set. 2023.

SAHA, A. K.; SARKER, P. K. Expansion due to alkali-silica reaction of ferronickel slag fine aggregate in OPC and blended cement mortars. **Construction and Building Materials**, v. 123, p. 135–142, 1 out. 2016.

WANG, Y.; XIANG, Z.; SU, Y.; HE, X.; YANG, J.; LI, Y.; JIN, Z.; STRNADEL, B. The carbon activation of electric furnace ferronickel slag and its utilization in cement-based materials. **Chemical Engineering Journal**, v. 496, p. 154389, 2024.