



Campus São Mateus
UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO



USO DE REJEITOS SIDERÚRGICOS NA PRODUÇÃO DE CONCRETOS SUSTENTÁVEIS: UMA ANÁLISE DE DESEMPENHO

Use of steel residue in the production of sustainable concrete: a performance analysis

Uso de desechos de acero en la producción de hormigón sostenible: Un análisis de desempeño

Mariana Zani Pagio¹, Lilian Favarato Carrareto², Geilma Lima Vieira³,
Cláudia Rodrigues Teles^{4*}, & Janaina dos Santos Vazzoler⁵

^{1 2 3 5} Universidade Federal do Espírito Santo, Centro Tecnológico - UFES, Goiabeiras

⁴ Universidade Federal do Espírito Santo, Centro Universitário Norte do Espírito Santo

¹ marianazpagio@gmail.com ² lilianfavarato@gmail.com ³ geilma.vieira@gmail.com ⁴ claudia.teles@ufes.br

⁵ janaina.vazzoler@gmail.com

ARTIGO INFO.

Recebido: 02.06.2025

Aprovado: 23.07.2025

Disponibilizado: 05.08.2025

PALAVRAS-CHAVE: Durabilidade; Penetração de cloretos; Propriedades mecânicas; Pó de FEA; Terra de Shredder

KEYWORDS: Durability; Chloride penetration; Mechanical properties; EAF dust; Shredder's residue

PALABRAS CLAVE: Durabilidad; Penetración de cloruros; Propiedades mecânicas; Polvo FEA; Tierra trituradora

*Autor Correspondente: Teles, C. R.

RESUMO

Esta pesquisa teve como objetivo avaliar o desempenho de concretos produzidos com a adição de dois tipos de resíduo – pó de FEA e resíduo de Shredder – nos níveis de 3% e 10%, e com duas diferentes relações água/aglomerante (0,45 e 0,60). Avaliou-se a influência da incorporação dos resíduos, separadamente, nos concretos, por meio da análise da massa específica, teor de ar incorporado, absorção capilar, potencial de corrosão das barras de aço inseridas no concreto, profundidade de penetração de cloretos (avaliada pelo método colorimétrico) e lixiviação de contaminantes. A utilização do resíduo de Shredder, apesar de ter reduzido a absorção capilar dos concretos com o aumento da dosagem, não apresentou resultados vantajosos em relação à proteção contra corrosão. Já a adição de pó de FEA apresentou bons resultados, reduzindo a absorção capilar e aumentando a proteção contra corrosão nos concretos com 10% de resíduo, além de reduzi-la levemente naqueles com adição de 3%, embora com desempenho muito próximo ao dos concretos de referência. Não houve lixiviação de contaminantes em nenhum dos concretos produzidos, o que indica que os compostos químicos potencialmente perigosos foram estabilizados na matriz cimentícia.

ABSTRACT

This research aimed to evaluate the performance of concrete produced with the addition of two types of residues — FEA powder and Shredder residue — at levels of 3% and 10%, and with two different water/binder ratios (0.45 and 0.60). The influence of the incorporation of each residue type into the concrete was assessed through measurements of specific mass, air content, capillary absorption, corrosion potential of embedded steel bars, chloride penetration depth (via colorimetric method), and leaching of contaminants. Although the use of Shredder residue reduced the capillary absorption of the concretes as the dosage increased, it did not provide significant benefits in corrosion protection. On the other hand, the addition of FEA powder yielded good results: it reduced capillary absorption, enhanced corrosion protection in concretes with 10% residue addition, and slightly reduced it in those with 3%, although values were very close to the reference concretes. No contaminant leaching was observed in any of the produced concretes, indicating that potentially hazardous chemical compounds were stabilized within the cementitious matrix.

RESUMEN

Esta investigación tuvo como objetivo evaluar el desempeño de concretos producidos con la adición de dos tipos de residuos — polvo de FEA y residuo de Shredder — en niveles del 3% y 10%, y con dos diferentes relaciones agua/aglomerante (0,45 y 0,60). Se evaluó la influencia de la incorporación de cada tipo de residuo por separado en los concretos, mediante el análisis de la masa específica, contenido de aire, absorción capilar, potencial de corrosión de las barras de acero insertadas, profundidad de penetración de cloruros (por el método colorimétrico) y lixiviación de contaminantes. Aunque el uso del residuo de Shredder redujo la absorción capilar a medida que aumentó la dosificación, no presentó resultados ventajosos en cuanto a la protección contra la corrosión. Por otro lado, la adición de polvo de FEA mostró buenos resultados, al reducir la absorción capilar y mejorar la protección contra la corrosión en concretos con adición del 10%, además de reducirla ligeramente en aquellos con el 3%, aunque con valores muy próximos a los concretos de referencia.

INTRODUÇÃO

Muitas indústrias siderúrgicas estão adotando a tecnologia de fornos elétricos a arco devido à crescente demanda por reciclagem de aço e à redução das emissões de gases de efeito estufa. No entanto, embora essa tecnologia represente uma oportunidade de reciclagem, ela também gera a produção de resíduos. No processo de reciclagem do aço, utiliza-se equipamento chamado triturador de Shredder. Após a trituração, todo o material é separado em duas frações principais: a metálica (ferrosa e não ferrosa), que é encaminhada ao forno elétrico a arco, e o restante, denominado resíduo de Shredder. O resíduo de Shredder é conhecido como Fluff ou Terra de Shredder. O Fluff é a fração mais leve, composta principalmente por plásticos, espuma e borracha, enquanto a Terra de Shredder é a fração mais pesada, composta principalmente por vidros, madeira e outros materiais finos, tendo um aspecto de solo, o que justifica sua nomenclatura. O pó do despoejamento do forno elétrico a arco (pó de FEA) é gerado durante a fusão de materiais ferrosos, e muitas agências ambientais o classificam como resíduo perigoso, já que, quando descartado no solo, pode lixiviar metais pesados, contaminando as águas subterrâneas (Nair et al., 2022).

Em 2016 a produção do resíduo Terra de Shredder no Brasil foi de aproximadamente 74 mil toneladas em uma única usina semi-integrada (Câmara et al., 2017). Quando aplicados em matrizes cimentícias, os resíduos atuam como material de enchimento inerte, produzindo efeito de preenchimento de poros e influenciando também a resistência à penetração de cloretos (Souza et al., 2010). Os resíduos parecem ter potencial para uso em estruturas de concreto, e as propriedades mecânicas de argamassas produzidas com esses resíduos têm sido analisadas por diversos pesquisadores (Vargas et al., 2006; Fares et al., 2016; Souza et al., 2010). No entanto, pouco se sabe sobre sua influência nas propriedades mecânicas e de durabilidade do concreto, quando exposto a ambientes agressivos

Fares et al. (2016), Maslehuddin et al. (2011) e Rubio-Cintas et al. (2019) relatam que o pó de FEA pode ser utilizado no setor da construção como matéria-prima complementar para concreto de cimento Portland, asfalto e cerâmica, e outras aplicações, em vez de ser descartado em aterros que provocam complicações ambientais. Os mesmos autores relatam que a natureza fina do pó de FEA melhora a trabalhabilidade do concreto e a plasticidade da argila utilizada em telhas e tijolos cerâmicos. O pó de FEA preenche os vazios e melhora a absorção de água, bem como a resistência mecânica e a durabilidade do produto (Nair et al., 2022). A tecnologia de fornos elétricos a arco produz 15-20 kg de pó de FEA para cada tonelada de aço produzida (Nikolic et al., 2020; Skaf et al., 2017). O pó de FEA foi classificado como resíduo perigoso pelas principais agências ambientais, incluindo a Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (US EPA) (Stathopoulos et al., 2013), devido à presença de metais pesados como Zn, Pb, As, Cu, Co e Cr. A solidificação do pó de FEA com diferentes ligantes, como cimento, argila, cinzas volantes e asfalto, pode impedir a migração e exposição a toxinas (Ledesma et al., 2017). Este conceito abriu caminho para a abordagem de mistura de pó de FEA em vários materiais cimentícios.

A utilização de resíduos siderúrgicos, tais como a terra de Shredder e o pó de FEA vem sendo estudados por diversos autores, quanto a sua utilização em matrizes cimentícias (Rosseti et al., 2006; Caetano et al., 2020; Magalhães et al., 2017; Magalhães et al., 2019; Souza et al., 2010; Fares et al., 2016; Vargas et al., 2006; Maslehuddin et al., 2011; Rubio-Cintas et al.,

2019) e cerâmicas (Figueiredo et al. 2016). No entanto, não há indícios de estudos que avaliem a incorporação da Terra de Shredder totalmente moída como matéria-prima de algum produto da construção civil; há apenas estudos sobre o uso da fração fina proveniente do triturador Shredder (Rossetti et al., 2006).

METODOLOGIA

Materiais

Definiu-se que os resíduos siderúrgicos utilizados deveriam apresentar finura conforme o parâmetro estabelecido pela NBR 12653 (ABNT, 2015), em que menos de 20% do material peneirado fique retido na peneira nº 325 (45 μm). Para isso foi necessário que a Terra de Shredder passasse por moagem em moinho de bolas e peneiramento em peneira de abertura de 1,18 mm. O material retido na peneira de malha de 1,18 mm foi descartado e utilizou-se a fração passante para a caracterização e produção dos concretos. O pó do despoeiramento do forno elétrico a arco (FEA) não necessitou da moagem. Tanto o pó de FEA quanto a Terra de Shredder, (Figura 1 a e b), são resíduos provenientes de uma indústria siderúrgica localizada em Vitória, estado do Espírito Santo, Brasil.

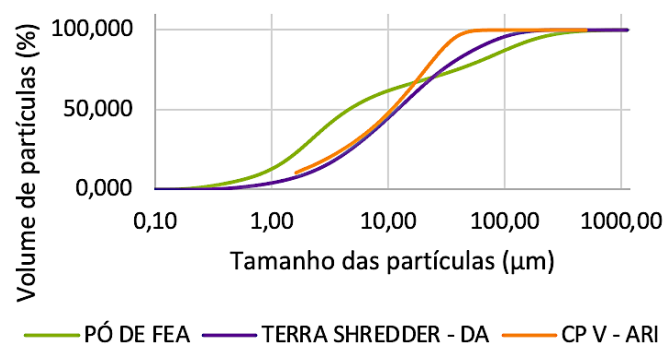
Figura 1. Terra de Shredder (a) e Pó de FEA (b)



Fonte: Autores (2023).

O cimento utilizado foi o Cimento Portland de Alta Resistência Inicial (CP V ARI). A distribuição granulométrica do cimento utilizado está apresentada na Figura 2 em comparação à Terra de Shredder e ao Pó de FEA respectivamente.

Figura 2. Distribuição granulométrica do Pó de FEA, de Terra Shredder e cimento Portland



Fonte: Autores (2023).

A distribuição granulométrica da Terra de Shredder, do pó de FEA e do cimento Portland CP V ARI foi avaliada por granulometria a laser (Figura 2). Os valores de D10, D50 e D90 da terra de Shredder foram 2,3, 13,4 e 71,3 μm , respectivamente. Observa-se que o cimento tem distribuição mais uniforme que o resíduo Terra de Shredder. Já os valores de D10, D50 e D90 do Pó de FEA foram 0,9, 5,1, 138,5 μm , respectivamente.

A Tabela 1 apresenta os resultados referentes à massa retida nas peneiras 325 e 200 além da massa específica e superfície específica por Blaine do resíduo Terra de Shredder, do Pó de FEA e do cimento Portland CP V ARI. Terra de Shredder apresentou 18,3% de material retido na peneira nº 325 (45 μm), enquanto o Pó de FEA apresentou massa retida de 20% na mesma peneira. Observa-se que o valor de superfície específica por Blaine da Terra de Shredder foi de 9405,79 cm^2/g , quase o dobro do valor obtido para o cimento, que foi de 4.926 cm^2/g , enquanto o Pó de FEA apresentou valor ainda maior, de 11656,15 cm^2/g (Silva et al., 2017).

Tabela 1. Caracterização física da Terra de Shredder, do pó de FEA e do cimento

| Testes | (NBR 12653) | Cimento | Terra de Shredder | Pó de FEA |
|---|-------------|---------|-------------------|-----------|
| Retido na peneira #325 (%) | ≤20% | - | 18,25 | 20% |
| Retido na peneira #200 (%) | - | 0,12 | - | - |
| Massa específica (g/cm^3) | - | 3,10 | 2,85 | 4,66 |
| Superfície específica Blaine (cm^2/g) | - | 4926 | 9405,79 | 11656,15 |

Fonte: Autores (2023).

A massa específica encontrada para o resíduo Terra de Shredder foi de 2,85 g/cm^3 , não muito inferior à do CP V ARI utilizado nesta pesquisa, que foi de 3,10 g/cm^3 . Já a massa específica do resíduo Pó de FEA foi de 4,66 g/cm^3 . Tanto os valores obtidos para a Terra de Shredder quanto para o Pó de FEA estão na mesma ordem de grandeza de valores característicos das pozolanas e de frações finas de resíduos do mesmo tipo utilizados como agregado miúdo em pesquisa de Caetano et al. (2020), que foi de 2,71 g/cm^3 .

A Tabela 2 apresenta a composição química do cimento e dos resíduos utilizados, por Fluorescência de Raios-X. Pode-se notar que o resíduo Terra de Shredder mostra uma predominância de sílica (SiO_2) e ferro (Fe_2O_3) em sua composição, que ocorre principalmente pelo fato do material ser composto por frações finas, como terra e areia, além de metais não recuperados durante o processamento da sucata ferrosa, como o ferro. A quantidade predominante de ferro e zinco observada no Pó de FEA pode ser explicada pelo fato do resíduo ser oriundo da fusão de sucata metálica dentro do forno elétrico a arco. A presença de sucata de aço galvanizado aumenta o teor de zinco do resíduo (Simonyan et al., 2019).

Tabela 2. Composição química da Terra de Shredder, do pó de FEA e do cimento

| Composição química | Cimento | Terra de Shredder | Pó de FEA |
|-------------------------|---------|-------------------|-----------|
| SiO_2 | 15,01 | 36 | 2,8 |
| ZnO | - | - | 19,0 |
| Al_2O_3 | 4,35 | 6,3 | 0,38 |
| K_2O | 0,36 | 0,56 | 1,6 |
| CaO | 57,6 | 4,9 | 4,3 |
| Fe_2O_3 | 3,15 | 29,8 | 42,5 |
| MgO | 2,29 | 1,8 | 3,1 |
| TiO_2 | - | 1,1 | <0,1 |
| SO_3 | 3,63 | 0,42 | 1 |
| P_2O_5 | - | 0,13 | 0,31 |
| MnO | - | 0,47 | 2,1 |
| Cr_2O_3 | - | 0,25 | 0,26 |
| Br | - | - | 0,11 |
| ZrO_2 | - | 0,11 | - |
| CuO | - | 0,11 | 0,2 |
| SrO | - | 0,19 | - |
| Na_2O | 0,16 | 2,9 | 8,4 |
| LOI | 3,77 | 13,4 | 2,38 |

Fonte: Autores (2023).

A caracterizações mineralógicas da Terra de Shredder e do pó de FEA foram determinadas com a utilização do equipamento de difração de raios X do LabPetro da Universidade Federal do Espírito Santo (UFES). Para a Terra de Shredder é possível identificar predominância de cristais de quartzo (SiO_2), em seguida, em menores intensidades, cristais de magnetita (Fe_3O_4), calcita (CaCO_3) e microclina (KAlSi_3O_8). Para o pó de FEA, podem ser observados picos bem definidos de cristais de Franklinita (ZnFe_2O_4) e, em seguida, porém em intensidades menores, também é possível notar a presença de Zincita (ZnO), Silvita (KCl), Cristobalita (SiO_2), Quartzo (SiO_2) e Dolomita ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$).

A caracterização microestrutural dos resíduos foi realizada por meio de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV). A caracterização ambiental avaliou a lixiviação e a solubilização dos resíduos por meio da NBR 10005 (ABNT, 2004) e NBR 10006 (ABNT, 2004) respectivamente.

Foram utilizados agregados miúdo e graúdo na produção dos concretos analisados. Como agregado miúdo foi utilizada areia natural de quartzo branca, que apresentou tamanho de grão máximo de 2,36 mm e massa específica de 2,64 g/cm^3 . O agregado graúdo, proveniente de britagem de rochas graníticas apresentou tamanho máximo de grão de 19 mm e massa específica de 2,78 g/cm^3 .

Proporções e produção dos traços

Estão apresentados na Tabela 3 os traços produzidos para esta pesquisa, bem como o consumo dos insumos (por m^3 de concreto). A dosagem seguiu os procedimentos do método IPT/EPUSP de Helene e Terzian(1992).

Tabela 3. Consumo dos insumos

| Misturas No. | a/c relação | Resíduos (%) | Cimento (kg/m^3) | Pó de FEA (kg/m^3) | Terra Shredder (kg/m^3) | Areia (kg/m^3) | Agregado graúdo (kg/m^3) | Água (kg/m^3) |
|--------------|-------------|--------------|------------------------------------|--------------------------------------|---|----------------------------------|--|---------------------------------|
| REF45 | 0,45 | 0 | 445 | 0 | 0 | 716 | 1072 | 200 |
| REF60 | 0,6 | | 300 | 0 | 0 | 846 | 1059 | 180 |
| PF03/45 | 0,45 | 3 | 437 | 13 | 0 | 704 | 1054 | 197 |
| PF03/60 | 0,6 | | 294 | 9 | 0 | 830 | 1040 | 177 |
| PF10/45 | 0,45 | 10 | 422 | 42 | 0 | 679 | 1017 | 190 |
| PF10/60 | 0,6 | | 286 | 29 | 0 | 807 | 1011 | 172 |
| TS03/45 | 0,45 | 3 | 433 | 0 | 13 | 697 | 1043 | 195 |
| TS03/60 | 0,6 | | 294 | 0 | 9 | 830 | 1040 | 177 |
| TS10/45 | 0,45 | 10 | 419 | 0 | 42 | 674 | 1009 | 188 |
| TS10/60 | 0,6 | | 286 | 0 | 29 | 806 | 1009 | 171 |

Fonte: Autores (2023).

Ensaio no estado endurecido

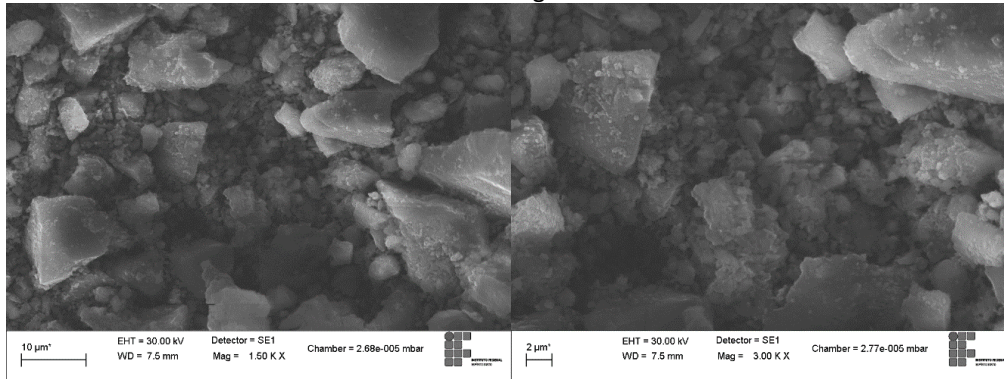
Foram utilizados corpos de prova cilíndricos de dimensões 10cm x 20cm e a moldagem, adensamento e cura foram realizados conforme a NBR 5738 (ABNT, 2016). Os ensaios de resistência à compressão axial seguiram os procedimentos descritos na norma NBR 5739 (ABNT, 2018). Os ensaios de moldagem, adensamento e cura foram realizados conforme a NBR 5738 (ABNT, 2016) e os ensaios do modo de elasticidade seguiram a ASTM C597 (ASTM, 2016), BS 1881-PART 203 e NBR 15630 (ABNT, 2009). Cinco corpos de prova de cada traço foram testados aos 7, 28 e 91 dias. Também foram avaliadas propriedades relacionadas com a durabilidade dos concretos produzidos com a incorporação dos resíduos siderúrgicos, por meio de ensaios como absorção por capilaridade, conforme a NBR 9779 (ABNT, 2012); potencial de corrosão, conforme a ASTM C876 (ASTM, 2015) e análise de altura de penetração de cloretos UNI 7928 (UNI, 1970).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Caracterização microestrutural

O resíduo Terra de Shredder apresenta-se como um material heterogêneo, química e mineralogicamente. Essa característica é evidenciada na morfologia, que pode ser influenciada pela moagem, e na variedade de tamanhos das partículas (Figura 3). Câmara (2017) analisou diferentes frações do resíduo do triturador de Shredder e observou a influência da heterogeneidade do material em suas características microestruturais.

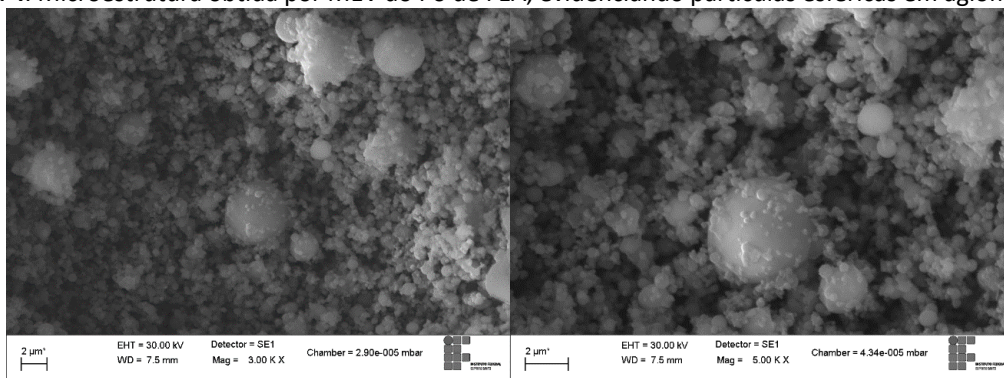
Figura 3. Microestrutura obtida por MEV do resíduo Terra de Shredder, evidenciando heterogeneidade morfológica



Fonte: Autores (2023).

Como apresentado na Figura 4, o Pó de FEA apresentou partículas com morfologia esférica, agrupadas em aglomerados de partículas menores que recobrem as maiores, similarmente aos resíduos do mesmo tipo estudados por Souza et al. (2010) e Machado et al. (2006). Esse formato esférico está associado ao mecanismo de formação das poeiras no forno elétrico a arco, resultante do rompimento de bolhas de monóxido de carbono no banho de aço e da volatilização de metais durante o processo de produção do aço (Sofilic et al., 2004; Machado et al., 2006). A forma esférica das partículas e sua superfície lisa podem contribuir para o aumento da fluidez das misturas de concreto, devido ao efeito lubrificante de rolamento (Mantovani et al., 2014), também chamado de *ball-bearing effect*.

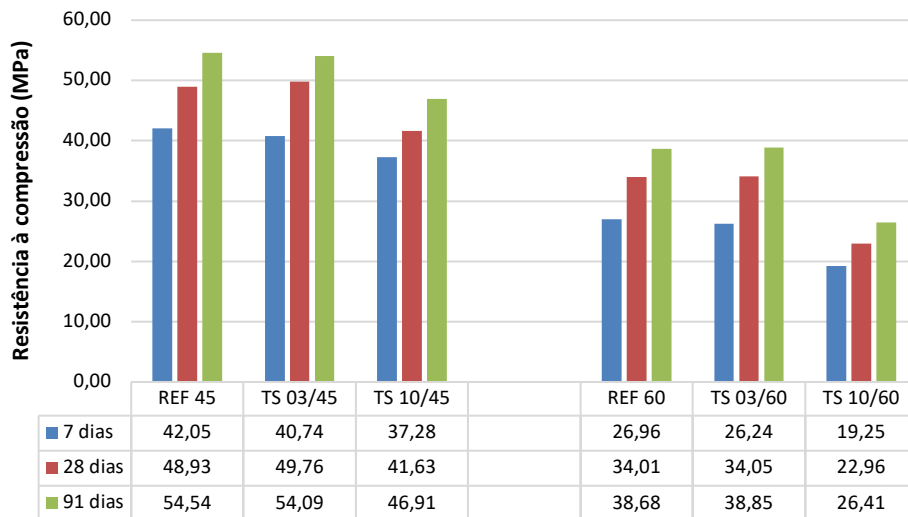
Figura 4. Microestrutura obtida por MEV do Pó de FEA, evidenciando partículas esféricas em aglomerados



Fonte: Autores (2023).

Resistência à Compressão

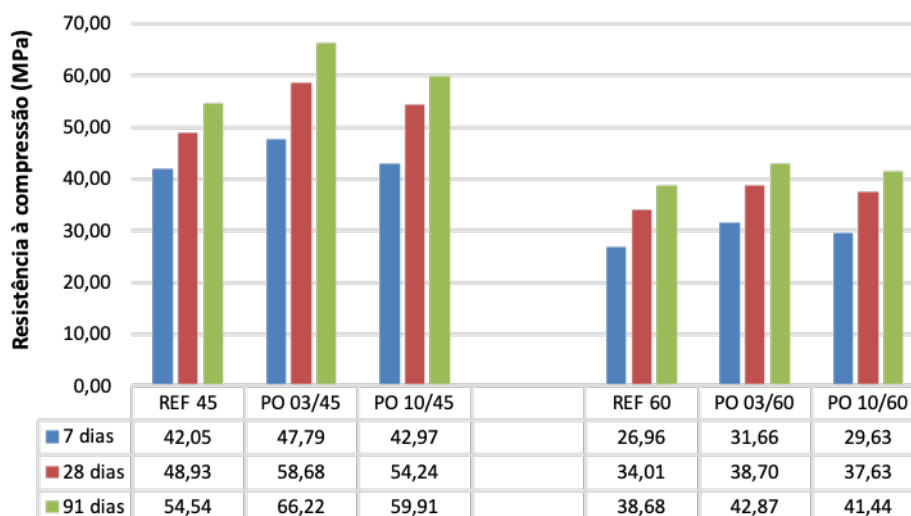
A partir da Figura 5, observam-se os resultados de resistência à compressão para os diferentes teores de Terra de Shredder (0%, 3% e 10%), diferentes relações a/c (0,45 e 0,60) e em diferentes idades (7, 28 e 91 dias). Houve redução dos valores de resistência à compressão com a incorporação do resíduo, especialmente para a adição de 10% de Terra de Shredder, com decréscimos de 14,95% e 14% aos 28 e 91 dias, respectivamente. Nota-se que houve aumento da resistência com o tempo, como esperado.

Figura 5. Resistência à compressão axial dos concretos com adição de Terra de Shredder, em diferentes idades

Fonte: Autores (2023).

Este comportamento não se mostra interessante do ponto de vista de contribuição às avaliações mecânicas, apesar de o teor de 3% ter apresentado pouca variação. Nos estudos de Caetano (2016) foram feitas substituições de 5%, 10%, 15% e 20% do resíduo (passante na peneira de 4,8mm) pela areia natural e foi constatado progressivo decréscimo da resistência dos concretos confeccionados.

Na Figura 6 estão representados os resultados dos concretos produzidos com adição de 3% e 10% de Pó de FEA e referência. Para misturas com relação a/c de 0,45, o ganho de resistência à compressão do concreto devido à adição de pó de FEA é evidente aos 3%, apresentando um aumento de 13,60%, 19,92% e 21,41%, nas idades 07, 28 e 91 dias, respectivamente, quando comparado à mistura de referência (relação 0,45 a/c, 0% pó de FEA). Além disso, os resultados das misturas com a incorporação do resíduo foram maiores quando comparadas com a mistura referência, para as duas relações a/c e todas as idades avaliadas. Houve aumento das resistências dos concretos com a idade, para todas as misturas e para as duas relações a/c avaliadas.

Figura 6. Resistência à compressão axial dos concretos com diferentes teores de pó de FEA em 7, 28 e 91 dias

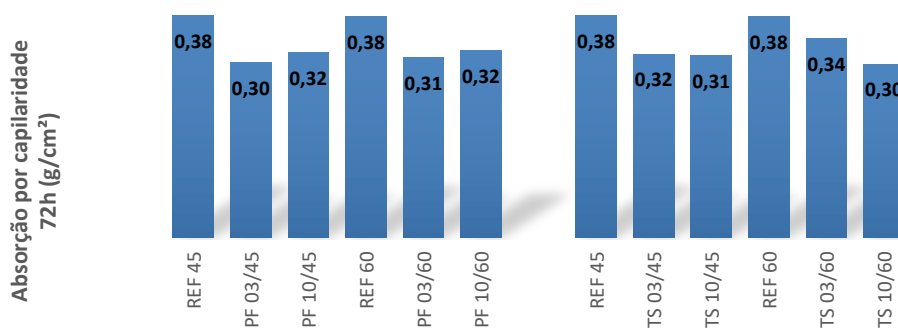
Fonte: Autores (2023).

Em concretos produzidos com substituição parcial do cimento Portland por 2% de Pó de FEA, Maslehuddin et al. (2011) também observaram aumento na resistência à compressão nos concretos produzidos com Pó de FEA em comparação ao concreto de referência. Tais resultados corroboram com o que foi apresentado em estudo de Al-Zaid et al. (1997), em que concretos produzidos com substituição do cimento Portland por 2% e 3% de Pó de FEA apresentaram aumento ou permanência da resistência à compressão dos concretos produzidos.

Absorção por capilaridade

Para avaliar os efeitos da incorporação dos resíduos Terra de Shredder e pó de FEA na absorção por capilaridade dos concretos, o ensaio foi realizado aos 91 dias (Figura 7).

Figura 7. Absorção por capilaridade dos concretos com adição de Terra de Shredder e pó de FEA aos 91 dias



Fonte: Autores (2023).

De modo geral, analisando as médias de absorção dos concretos nota-se uma diminuição da absorção por capilaridade dos concretos com adição de resíduos com relação aos concretos de referência. Tal resultado está de acordo com o que outros trabalhos sugerem, tendo em vista que outras pesquisas, como a de Selvakumar et al. (2023) e de Maslehuddin et al. (2011), demonstraram que o uso desse tipo de resíduo na produção de concretos pode causar essa diminuição. Entretanto, para argamassas autoadensáveis produzidas com substituição da sílica ativa por pó de FEA, os valores de absorção por capilaridade foram maiores com a incorporação do pó de FEA (Lozano-Lunar et al., 2019).

Há uma tendência de redução da absorção por capilaridade com o aumento do teor de adição desses resíduos. Os concretos com adição de 10% de Terra de Shredder tiveram menor absorção capilar quando comparados aos demais. Com relação ao concreto de referência, houve uma diminuição de aproximadamente 14% na absorção por capilaridade dos concretos com 3% de adição de resíduo Terra de Shredder é de aproximadamente 19% para adição de 3% de Pó de FEA. Para os concretos produzidos com 10% desses resíduos, a redução na absorção por capilaridade foi de 20% para os concretos com Terra de Shredder e de 16% com Pó de FEA quando comparados ao concreto de referência.

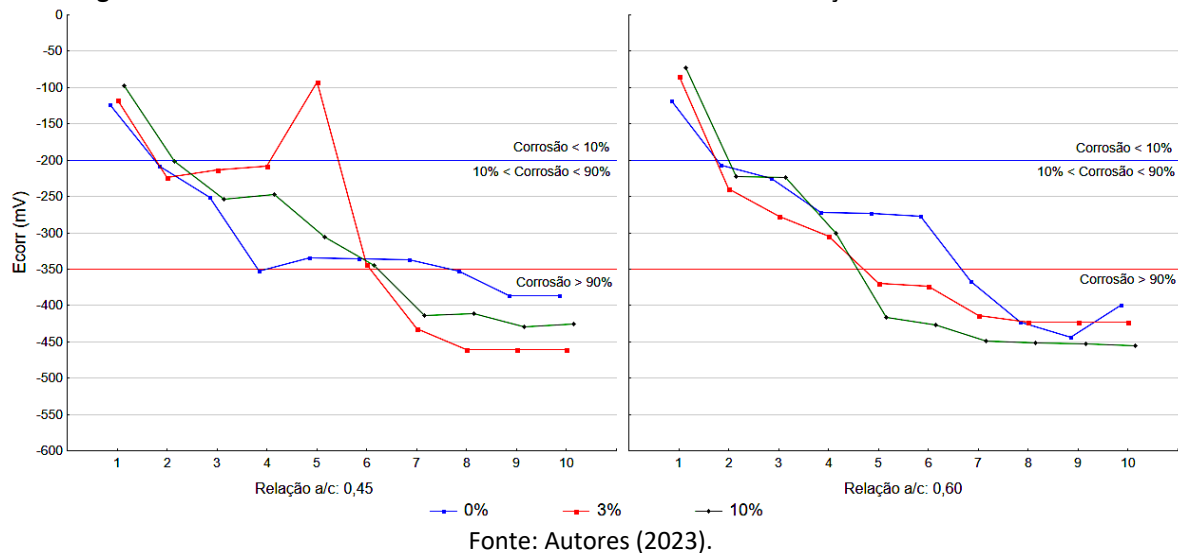
É possível que o resíduo tenha contribuído para um maior empacotamento da matriz cimentícia devido à finura dos grãos. Hakeem et al. (2023) avaliaram a substituição de areia fina por cinza de petróleo e pó de FEA na produção de concreto de alto desempenho. Os resultados revelaram uma matriz microestrutural densa. Consequentemente, com baixa capacidade de absorção de água e permeabilidade à água.

Potencial de corrosão

O ensaio teve início aos 28 dias de idade dos concretos com a realização de ciclos de imersão e secagem. O potencial de corrosão das armaduras foi medido após o fim da etapa de secagem em estufa dos corpos de prova em todos os ciclos até que as armaduras apresentassem potencial de corrosão maior que 90%, ou seja, potencial eletroquímico inferior a -350 mV.

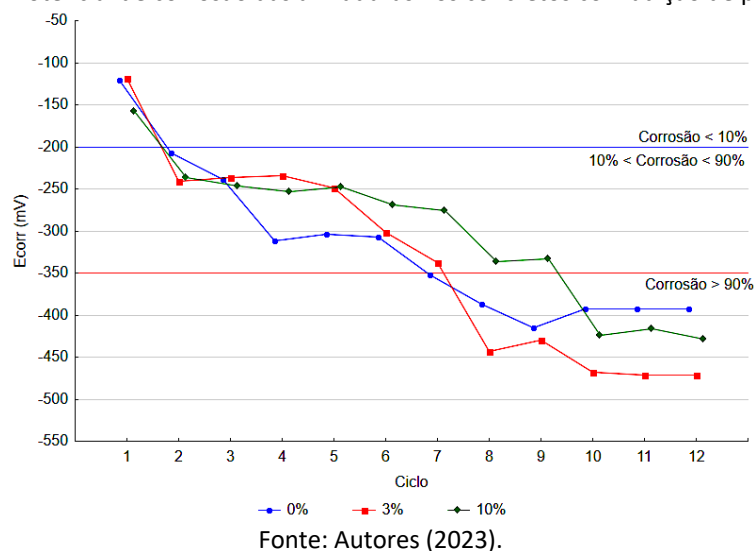
Na Figura 8 da interação entre o ciclo, a relação a/c e o percentual de resíduo nota-se que para a relação a/c 0,45, os concretos de referência (produzidos sem a adição de resíduos) obtiveram melhores resultados comparados aos com adição. Do mesmo modo ocorreu para os concretos produzidos com a relação a/c 0,60. Não foi constatada uma melhora na durabilidade dos concretos com adição de Terra de Shredder. Por ser um material heterogêneo, composto por terra e diversos outros materiais que variam de acordo com a sucata utilizada, a adição da Terra de Shredder pode ser prejudicial à durabilidade do concreto.

Figura 8. Potencial de corrosão das armaduras nos concretos com adição de Terra de Shredder



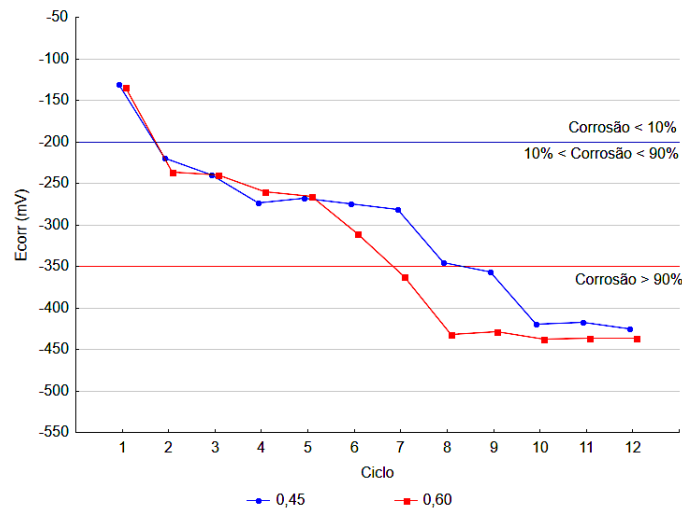
A interação entre a idade (ciclo de ensaio) e o percentual de pó de FEA adicionado ao concreto, mostrada na Figura 9, aponta que os concretos com adição de 10% de pó de FEA foram os que tiveram um melhor comportamento frente à corrosão. Já os concretos de referência e com 3% de adição tiveram um comportamento semelhante.

Figura 9. Potencial de corrosão das armaduras nos concretos com adição de pó de FEA



A interação entre a idade (ciclo de ensaio) e a relação a/c (Figura 10) mostra que, entre as duas relações a/c utilizadas, os concretos com relação de 0,45 demoraram mais tempo para apresentar despassivação das armaduras. Enquanto os concretos de relação a/c 0,60 apresentaram despassivação a partir do 7º ciclo (77 dias), os de relação a/c 0,45 foram a partir do 9º ciclo (91 dias). Assim como mencionado sobre a figura da variação da relação a/c sobre os resultados de potencial de corrosão, menores relações a/c possuem menor volume de poros e menor quantidade de água disponível, retardando a difusão dos cloretos no concreto (Cascardo, 1997).

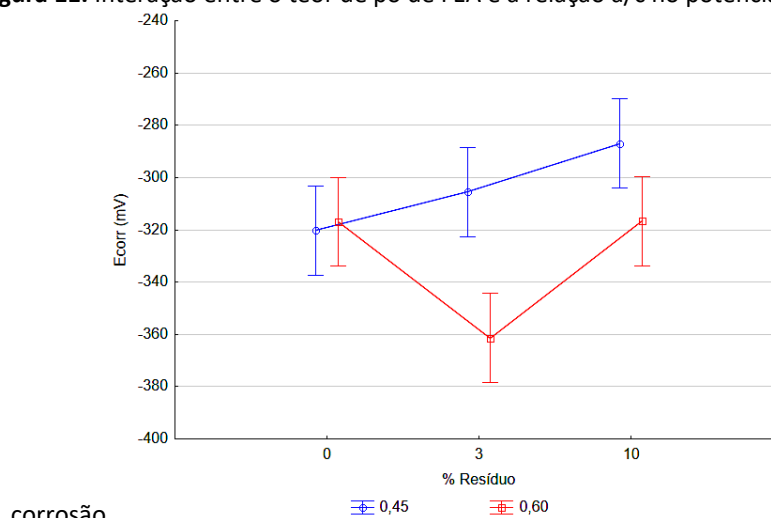
Figura 10. Influência da relação a/c no potencial de corrosão em função da idade (ciclos)



Fonte: Autores (2023).

A interação entre o percentual de adição de resíduo e a relação a/c, apresentada na Figura 11, mostra que para a relação a/c de 0,45, houve uma melhora gradativa no desempenho dos concretos à medida que aumentava o percentual de adição de pó de FEA. Para relação a/c de 0,60, ocorreu uma piora no resultado de potencial de corrosão para os concretos com 3% de adição, enquanto os de referência e os com 10% de adição se mantiveram praticamente na faixa.

Figura 11. Interação entre o teor de pó de FEA e a relação a/c no potencial de



corrosão

Fonte: Autores (2023).

De modo geral, analisando as figuras apresentadas e com ênfase nos concretos produzidos com relação a/c 0,45, é possível perceber um retardo no início do processo de despassivação e corrosão das armaduras, indicando um aumento da vida útil das estruturas de concreto armado com adição de pó de FEA.

Assim como observado por Maslehuddinet al. (2011) em sua pesquisa, concretos produzidos com o uso do pó de FEA como substituição ao cimento apresentaram um retardo no início do processo de corrosão das barras de aço. Esse comportamento benéfico foi atribuído a uma densificação da matriz cimentícia e a uma mudança no ambiente eletroquímico em torno das barras de aço causada pela interação entre os compostos do resíduo, principalmente o zinco, e os compostos do cimento.

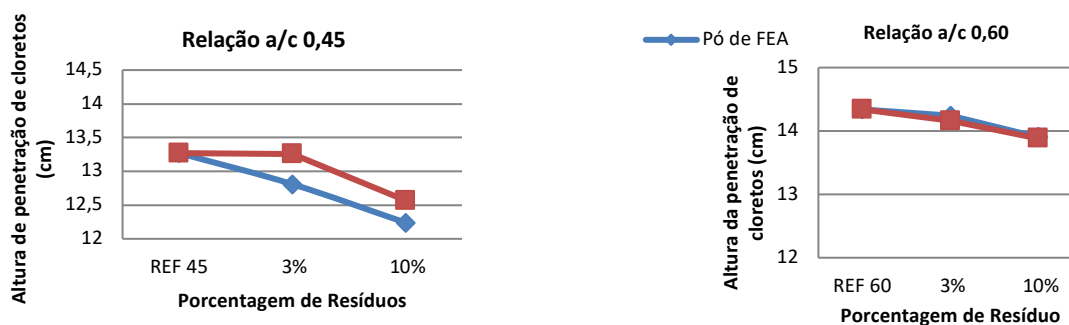
Essa mudança no ambiente eletroquímico se torna mais evidente quando são comparados os resultados dos concretos produzidos com adição de Terra de Shredder e os concretos com pó de FEA, pois os dois resíduos contribuíram no refinamento dos poros da matriz, devido às suas elevadas finuras. Porém, enquanto as barras de aço dos concretos com adição de Terra de Shredder passaram a despassivar a partir do 6º ciclo, ou seja, por volta dos 70 dias de idade, as barras dos concretos com adição de pó de FEA passaram a apresentar sinais de despassivação somente a partir do 8º ciclo (84 dias).

Análise de altura de penetração de cloretos

A partir dos resultados obtidos quanto à altura de penetração de cloretos, é possível afirmar que houve interferência da porcentagem de resíduos utilizada.

A Figura 12 mostra as médias das alturas de penetração de cloretos medidas nas superfícies dos concretos produzidos com o resíduo pó de FEA, ensaiados com o indicador químico nitrato de prata (AgNO_3), que foram aferidas pelo software Autocad®. Assim como observado nos concretos com Terra de Shredder, também é possível notar um aumento nas alturas médias de penetração nos concretos produzidos com a relação a/c de 0,60 quando comparados aos de 0,45.

Figura 12. Altura média da penetração de íons cloreto em concretos com adição de pó de FEA e Terra de Shredder (ensaio com nitrato de prata, 91 dias)



Fonte: Autores (2023).

É possível, portanto, indicar que a utilização do resíduo Terra de Shredder não influi diretamente na diminuição da altura de penetração de íons cloreto, mas a utilização do Pó de FEA em 10% resultou em uma diminuição considerável, corroborando o resultado obtido no ensaio de potencial de corrosão. Esse comportamento foi observado por Selvakumar et al., (2023), que realizaram o teste rápido de penetração de cloreto com cilindro de concreto de 10 cm de diâmetro e 5 cm de altura produzido com esse tipo de resíduo como agregado miúdo. Já Hakeem et al. (2023) fizeram testes de permeabilidade a cloretos em corpos de prova de cilindros de 75 × 150 mm, demonstrando que o concreto apresentou um valor insignificante de permeabilidade ao íon cloreto, devido à microestrutura densa garantida pelo pó de FEA e cinza de petróleo.

Tanto para os concretos produzidos com Pó de FEA e Terra de Shredder, os concretos com menor relação a/c (0,45) obtiveram menores alturas de penetração de íons cloreto, o que já era esperado, devido à menor porosidade do material produzido.

Avaliação ambiental

A avaliação ambiental, feita por meio da análise do extrato lixiviado das amostras é apresentada na Tabela 4. É importante mencionar que a Terra de Shredder é classificada como Classe II – A (não perigoso e não inerte) pela NBR 10.004 (ABNT, 2004a) o que indica que, apesar de não ser considerado perigoso, ele possui propriedades relativas à solubilidade de metais em água sendo necessária a avaliação das propriedades de lixiviação após sua incorporação no concreto. Já o Pó de FEA (Tabela 5) é classificado como Classe I – Perigoso pela mesma norma. Assim, o ensaio de tanque é uma forma de avaliar a capacidade desse material em encapsular os metais presentes no resíduo e assim verificar se o uso do resíduo é seguro do ponto de vista ambiental. Os resultados apresentados são relativos ao somatório dos ciclos de lixiviação feitos durante 64 dias e expressos em miligramas por metro quadrado do corpo de prova.

Tabela 4. Lixiviação acumulada de metais nos concretos com adição de Terra de Shredder, após 64 dias de ensaio em tanque (mg/m²)

| Elementos | U1 (mg/m ²) | U2 (mg/m ²) | REF 45 | TS 03/45 | TS 10/45 | REF 60 | TS 03/60 | TS 10/60 |
|---------------|-------------------------|-------------------------|--------|----------|----------|--------|----------|----------|
| Arsênio (As) | 40 | 300 | ND | 0,020 | 0,061 | ND | 0,047 | 0,056 |
| Cádmio (Cd) | 1 | 7,5 | ND | 0,001 | ND | ND | 0,003 | ND |
| Chumbo (Pb) | 100 | 800 | 0,042 | 0,043 | 0,126 | 0,027 | 0,092 | 0,112 |
| Cobalto (Co) | 25 | 200 | 0,039 | 0,021 | 0,054 | 0,045 | 0,044 | 0,080 |
| Cromo (Cr) | 150 | 950 | 0,068 | 0,814 | 0,857 | 0,427 | 1,335 | 0,922 |
| Manganês (Mn) | - | - | 0,070 | 0,027 | 0,152 | 0,030 | 0,164 | 0,160 |
| Mercúrio (Hg) | 0,4 | 3 | ND | 0,004 | 0,004 | ND | ND | 0,011 |
| Selênio (Se) | 1,5 | 9,5 | ND | ND | ND | ND | ND | ND |
| Zinco (Zn) | 200 | 1500 | 0,361 | 0,424 | 1,407 | ND | 0,728 | 1,738 |

Fonte: Autores (2023).

Tabela 5. Lixiviação acumulada de metais nos concretos com adição de pó de FEA, após 64 dias de ensaio em tanque (mg/m²)

| Elementos | U1 (mg/m ²) | U2 (mg/m ²) | REF 45 | PO 03/45 | PO 10/45 | REF 60 | PO 03/60 | PO 10/60 |
|---------------|-------------------------|-------------------------|--------|----------|----------|--------|----------|----------|
| Arsênio (As) | 40 | 300 | ND | 0,015 | ND | ND | 0,007 | 0,039 |
| Cádmio (Cd) | 1 | 7,5 | ND | 0,002 | 0,001 | ND | 0,007 | 0,006 |
| Chumbo (Pb) | 100 | 800 | 0,042 | 0,362 | 0,536 | 0,027 | 1,519 | 9,710 |
| Cobalto (Co) | 25 | 200 | 0,039 | 0,058 | 0,024 | 0,045 | 0,045 | 0,070 |
| Cromo (Cr) | 150 | 950 | 0,068 | 0,611 | 0,094 | 0,427 | 0,074 | 0,198 |
| Manganês (Mn) | - | - | 0,070 | 0,104 | 0,022 | 0,030 | 0,061 | 0,055 |
| Mercúrio (Hg) | 0,4 | 3 | ND | ND | ND | ND | ND | ND |
| Selênio (Se) | 1,5 | 9,5 | ND | ND | 0,075 | ND | ND | 0,317 |
| Zinco (Zn) | 2000 | 1500 | 0,361 | 3,603 | 3,00 | ND | 3,558 | 6,124 |

Fonte: Autores (2023).

Pelos valores encontrados nota-se que nenhuma mistura apresentou elementos excedentes aos parâmetros de U1 indicados na norma NEN 7375 (NNI, 2004). Isso indica que o uso da Terra de Shredder e do Pó de FEA em blocos monolíticos de concreto é seguro do ponto de vista ambiental. De maneira geral, os valores de extrato lixiviado foram ligeiramente superiores para as relações a/c de 0,6. Tal comportamento é explicado pelo fato de que, em relações a/c menores a matriz se apresenta de forma mais compacta e os vazios capilares são menores e mais estreitos, contribuindo no encapsulamento dos metais (Jochem, 2017).

Souza et al. (2010) avaliaram a lixiviação e a solubilização das amostras de concreto produzidos com Pó de FEA e compararam os valores com o que é estabelecido na norma brasileira NBR 10.004 (ABNT, 2004a). Como resultado, os autores notaram que nenhum metal ultrapassou os limites estabelecidos, exceto o alumínio o qual foi atribuído à dissociação do aluminato de cálcio presente no clínquer. A incorporação de resíduo foi de 20% em massa e o teor de zinco da amostra é de 10,76% e, para este cenário, o concreto é capaz de estabilizar elementos potencialmente tóxicos presentes no resíduo.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Pó de FEA

Apresenta grãos com formato predominantemente esférico e elevada finura, o que contribui para o aumento da fluidez do concreto, mantendo sua coesão. A quantidade de zinco impacta a formação dos compostos hidratados do cimento, conferindo melhores resultados mecânicos, embora também possa influenciar o tempo de hidratação.

Em relação a sua aplicação nos concretos, pode-se perceber que o resíduo age quimicamente nas misturas, por meio da formação de novos compostos hidratados que conferem maior resistência mecânica aos concretos, entretanto, deve-se considerar que os resultados encontrados estão vinculados à quantidade de metais pesados na amostra (especialmente o zinco), pois são eles que participam do processo de hidratação. Nesta pesquisa, o teor de 3% de adição foi o que apresentou os resultados mais otimizados em termos de propriedades no estado endurecido, apesar de a adição de 10% também se apresentar melhor do que o concreto de referência.

No estado endurecido, observou-se melhora na absorção por capilaridade dos concretos com adição de pó de FEA em relação aos concretos de referência, destacando-se o teor de 3% como o de melhor desempenho, embora o teor de 10% também tenha apresentado bons resultados. A melhora na absorção é atribuída a formação de novos produtos hidratados devido à interação dos íons zinco do pó de FEA com o cimento durante a hidratação, densificando a matriz cimentícia.

A utilização do pó de FEA no concreto apresentou desempenho satisfatório para o ensaio de potencial de corrosão nos teores de adição de 10% para as duas relações a/c utilizadas, mas principalmente quando foi utilizada a relação a/c de 0,45. Já o teor de 3% não teve um bom resultado quando utilizado com a relação a/c de 0,60. Dessa forma, os concretos com 10% de pó de FEA e relação a/c de 0,45 apresentaram menor probabilidade de corrosão, embora o uso do teor de 3% com essa mesma relação também seja viável. Os resultados deste ensaio foram corroborados pelo ensaio de aspensão do indicador nitrato de prata, que apresentaram os mesmos resultados referentes à altura de penetração de cloretos.

Sua classificação ambiental (resíduo perigoso) deve ser alvo de atenção de modo que os metais pesados não ofereçam riscos ambientais e à saúde dos usuários. O ensaio de lixiviação indica que, do ponto de vista ambiental, o resíduo incorporado nas porcentagens analisadas não apresenta restrições de uso, não oferecendo riscos ao ambiente ou aos usuários; contudo, deve-se considerar a composição química específica do resíduo e os teores utilizados.

Terra de Shredder

Para incorporação no concreto, houve uma etapa de beneficiamento, de modo que o resíduo atingisse uma granulometria semelhante à do cimento. Trata-se de um resíduo altamente heterogêneo, gerado a partir do aproveitamento de sucatas variadas, o que permite a presença de diversos materiais provenientes de sucatas ferrosas.

A heterogeneidade mencionada impacta negativamente as propriedades mecânicas, sendo observada uma perda de resistência proporcional ao aumento da adição do resíduo. De maneira geral, pelos resultados apresentados, é possível concluir que a adição da Terra de Shredder às misturas produzidas não traz benefícios mecânicos para os concretos, tendo o percentual de adição de 3% como o menos danoso.

No estado endurecido, os concretos com adição do resíduo apresentaram redução na absorção por capilaridade, sendo que aqueles produzidos com 10% de adição apresentaram melhores resultados, indicando uma possível contribuição no empacotamento da matriz cimentícia devido à finura dos grãos.

No ensaio de potencial de corrosão, não houve melhora significativa na proteção à ação dos íons cloretos com a adição do resíduo, pois os concretos de referência apresentaram menores valores de potencial de corrosão em comparação às demais misturas, sendo os produzidos com relação a/c de 0,45 os mais eficientes, corroborado pelo ensaio de espectroscopia por indução colorimétrica com aspersão do nitrato de prata, que mostrou maiores alturas de penetração de cloretos para os concretos produzidos com a relação a/c de 0,60.

Por ser um material heterogêneo, composto por terra e diversos outros materiais que variam de acordo com a sucata utilizada, a adição da Terra de Shredder pode ser prejudicial à durabilidade do concreto. De modo geral, a utilização do resíduo Terra de Shredder não foi muito vantajosa para a durabilidade dos concretos, especialmente quando se fala de concreto armado. Apesar da melhora na absorção por capilaridade, a heterogeneidade do material e o aumento da probabilidade de corrosão das armaduras dificultam o seu uso em concretos armados. Portanto, a aplicação da Terra de Shredder é mais indicada em concretos não estruturais, como blocos para pavimentação, onde os requisitos de desempenho mecânico e durabilidade são menos críticos, como já estudado por outros autores, e com menores relações água/cimento das misturas produzidas. Assim como ocorreu com os concretos com o Pó de FEA, as misturas com adição da Terra de Shredder não apresentam restrições de uso, do ponto de vista ambiental, sem oferecer riscos à saúde dos usuários e ao meio ambiente.

REFERÊNCIAS

Al-Zaid, R. Z., Al-Sugair, F. H., & Al-Negheimish, A. L. (1997). Investigation of potential uses of electric arc furnace dust (EAFD) in concrete. *Cement and Concrete Research*, 27(2), 267-278. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(96\)00204-9](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(96)00204-9)

American Society for Testing and Materials. (2016). *ASTM C597-16: Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concrete*. ASTM International. <https://www.astm.org/c0597-16.html>

Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2015). *NBR 12653: Materiais pozolânicos – Requisitos*. Recuperado de <https://www.abntcatalogo.com.br/norma.aspx?ID=319105>

Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2015). *NBR 5738: Moldagem e cura de corpos-de-prova cilíndricos ou prismáticos de concreto - Procedimento*. Recuperado de <https://www.abntcatalogo.com.br/norma.aspx?ID=329309>

Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2018). *NBR 5739: Concreto – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos*. Recuperado de <https://www.abntcatalogo.com.br/norma.aspx?ID=394080>

Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2011). *NBR 7222: Concreto e argamassa – Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos*. Recuperado de <https://www.abntcatalogo.com.br/norma.aspx?ID=319098>

Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2009). *NBR 15630: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação do módulo de elasticidade dinâmico*. Recuperado de <https://www.abntcatalogo.com.br/norma.aspx?ID=320289>

Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2012). *NBR 9779: Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água por capilaridade*. Recuperado de

<https://www.abntcatalogo.com.br/norma.aspx?ID=27572>

British Standards Institution. (1990). *BS 1881: Part 203 – Testing Concrete – Recommendations for the measurement of dynamic modulus of elasticity*. Recuperado de <https://www.bsigroup.com/>

Caetano, J. A., Schalch, V., & Pablos, J. M. (2020). Characterization and recycling of the fine fraction of automotive shredder residue (ASR) for concrete paving blocks production. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 22(4), 835-847. <https://doi.org/10.1007/s10098-020-01825-y>

Caetano, J. A. (2016). *Reaproveitamento do resíduo Terra de Shredder através da técnica de solidificação/estabilização em matrizes de cimento Portland para aplicação na construção civil* (Dissertação de Mestrado, Universidade de São Paulo). Recuperado de <https://doi.org/10.11606/D.18.2017.tde-24032017-104055>

Câmara, G. G. (2017). *Caracterização das frações do resíduo do triturador de sucata de uma siderúrgica* (Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul). Recuperado de <https://lume.ufrgs.br/handle/10183/180144>

Fares, G., Al-Zaid, R. Z., Fauzi, A., Alhozaimy, A. M., Al-Negheimish, A. I., & Khan, M. (2016). Performance of optimized electric arc furnace dust-based cementitious matrix compared to conventional supplementary cementitious materials. *Construction and Building Materials*, 112, 210–221. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.02.068>

Figueiredo, J. D. C. (2016). *Aplicação de uma fração do resíduo do Shredder na fabricação de blocos cerâmicos estruturais* (Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul). Recuperado de <https://lume.ufrgs.br/handle/10183/163457>

Hakeem, I. Y., Hosen, A., Tayeh, B. A., & Alhamami, A. (2023). Innovative Ultra-High-Performance Concrete (UHPC) incorporating oil ash and electric arc furnace dust. *Case Studies in Construction Materials*, 19, e01843. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e01843>

Ledesma, E. F., Jiménez, J. R., Ayuso, J., Fernández, J. M., & de Brito, J. (2017). Experimental study of the mechanical stabilization of electric arc furnace dust using fluid cement mortars. *Journal of Hazardous Materials*, 326, 26–35. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2016.11.051>

Helene, P. & Terzian, P. (1992). *Manual de dosagem e controle do concreto*. São Paulo: PINI.

Lozano-Lunar, A., da Silva, P. R., de Brito, J., Álvarez, J. I., Fernández, J. M., & Jiménez, J. R. (2019). Performance and durability properties of self-compacting mortars with electric arc furnace dust as filler. *Journal of Cleaner Production*, 222, 59–69. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.02.145>

Machado, J. G. M. S., Brehm, F. A., Moraes, C. A. M., Santos, C. A., Vilela, A. C. F., & Cunha, J. B. M. (2006). Chemical, physical, structural and morphological characterization of the electric arc furnace dust. *Journal of Hazardous Materials*, 136(3), 953–960. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2006.01.044>

Magalhães, M. S., Faleschini, F., Pellegrino, C., & Brunelli, K. (2017). Cementing efficiency of electric arc furnace dust in mortars. *Construction and Building Materials*, 157, 141–150. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.09.074>

Magalhães, M. S., Faleschini, F., Pellegrino, C., & Brunelli, K. (2019). Influence of alkali addition on the setting and mechanical behavior of cement pastes and mortars with electric arc furnace dust. *Construction and Building Materials*, 214, 413-419. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.04.141>

Mantovani, F., Kulakowski, M. P., & Moraes, C. A. M. (2014). Viabilidade do uso de pó de aciaria para pigmentação de concreto. In *45º Seminário de Aciaria – Internacional* (pp. 255-262). Porto Alegre, RS. Recuperado de <https://www.alacero.org/sites/default/files/seminario/ponencias/ponencia-aciaria-2014-Fabio%20Mantovani.pdf>

Maslehuddin, M., Awan, F. R., Shameem, M., Ibrahim, M., & Ali, M. R. (2011). Effect of electric arc furnace dust on the properties of OPC and blended cement concretes. *Construction and Building Materials*, 25(1), 308-312. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.06.024>

Nair, A. T., Mathew, A., Archana, A. R., & Akbar, M. A. (2022). Use of hazardous electric arc furnace dust in the construction industry: A cleaner production approach. *Journal of Cleaner Production*, 377, 134282. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.134282>

Nikolic, I., Durovic, D., Blečić, D., Zejak, R., Karanovic, L., Mitsche, S., & Radmilovic, V. R. (2013). Geopolymerization of coal fly ash in the presence of electric arc furnace dust. *Minerals Engineering*, 49, 24–32. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2013.04.007>

Rossetti, V. A., Di Palma, L., & Medici, F. (2006). Production of aggregate from non-metallic automotive shredder residues. *Journal of Hazardous Materials*, 137(2), 1089–1095. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2006.03.048>

- Rubio-Cintas, M. D., Barnett, S. J., Pérez-García, F., & Parrón-Rubio, M. E. (2019). Mechanical-strength characteristics of concrete made with stainless steel industry wastes as binders. *Construction and Building Materials*, 204, 675-683. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.01.166>
- Selvakumar, M., Muthu, S., Laksmi, K. B., Srinivasan, D., & Santhosh, S. (2023). Properties of high-performance concrete with automobile grinding waste as replacement of fine aggregate. *Materials Today: Proceedings*, 80(2), 1291–1296. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.01.059>
- Silva, M. G., Battagin, A. F., & Gomes, V. (2017). Cimentos Portland com adições minerais. In G. C. Isaia (Ed.), *Materiais de construção civil* (3ª ed., pp. 791–823). IBRACON.
- Simonyan, L. M., Alpatova, A. A., & Demidova, N. V. (2019). The EAF dust chemical and phase composition research techniques. *Journal of Materials Research and Technology*, 8(2), 1601–1607. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2018.10.002>
- Souza, C. A. C., Machado, A. T., Lima, L. R. P. A., & Cardoso, R. J. C. (2010). Stabilization of electric-arc furnace dust in concrete. *Materials Research*, 13(4), 513–519. Recuperado de <https://www.scielo.br/j/mr/a/5KyP3b47BktZ5GJDtS/WjGDC/?lang=en>
- Stathopoulos, V. N., Papandreou, A., Kanellopoulou, D., & Stournaras, C. J. (2013). Structural ceramics containing electric arc furnace dust. *Journal of Hazardous Materials*, 262, 91-99. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2013.08.028>
- Skaf, M., Manso, J. M., Aragon, A., Fuente-Alonso, J. A., & Ortega-Lopez, V. (2017). EAF slag in asphalt mixes: A brief review of its possible use. *Resources, Conservation and Recycling*, 120, 176-185. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2016.12.009>
- UNI – Unificazione Nazionale Italiana. (1970). *UNI 7928: Determinazione della penetrabilità dello ione cloruro*. Italian Standard.
-