

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO TECNOLÓGICO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

LILIAN FAVARATO CARRARETO

**AVALIAÇÃO DE ASPECTOS RELACIONADOS À DURABILIDADE DE
CONCRETOS PRODUZIDOS COM RESÍDUOS SIDERÚRGICOS DE TERRA DE
SHREDDER E PÓ DE FEA**

Vitória
2022

LILIAN FAVARATO CARRARETO

**AVALIAÇÃO DE ASPECTOS RELACIONADOS À DURABILIDADE DE
CONCRETOS PRODUZIDOS COM RESÍDUOS SIDERÚRGICOS DE TERRA DE
SHREDDER E PÓ DE FEA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, na área de concentração Construção Civil.

Orientadora: Prof^a Dr^a Geilma Lima Vieira

Vitória

2022

Ficha catalográfica disponibilizada pelo Sistema Integrado de
Bibliotecas - SIBI/UFES e elaborada pelo autor

C313a Carrareto, Lilian Favarato, 1994-
Avaliação de aspectos relacionados à durabilidade de concretos
produzidos com resíduos siderúrgicos de Terra de Shredder e pó
de FEA / Lilian Favarato Carrareto. - 2022.
156 f. : il.

Orientadora: Geilma Lima Vieira.
Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade
Federal do Espírito Santo, Centro Tecnológico.

1. Concreto. 2. Resíduos industriais. 3. Resíduos como
material de construção. 4. Sustentabilidade. 5. Siderurgia. I.
Vieira, Geilma Lima. II. Universidade Federal do Espírito Santo.
Centro Tecnológico. III. Título.

CDU: 624

LILIAN FAVARATO CARRARETO

**AVALIAÇÃO DE ASPECTOS RELACIONADOS À DURABILIDADE DE
CONCRETOS PRODUZIDOS COM RESÍDUOS SIDERÚRGICOS DE TERRA DE
SHREDDER E PÓ DE FEA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Aprovada em 23 de março de 2022.

COMISSÃO EXAMINADORA

Prof^a Dra Geilma Lima Vieira
Doutora em Engenharia Civil
Orientadora – UFES

Prof Dr Ronaldo Pilar
Doutor em Engenharia Civil
Examinador Interno - UFES

Prof^a Dra Fernanda Macedo Pereira
Doutora em Engenharia de Minas,
Metalúrgica e de Materiais
Examinadora Externa - ULBRA

Vitória – ES, março de 2022

Aos meus pais,
Dácio e Giceia

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por ter me amparado até aqui e ter me guiado em todos os momentos, me ajudando a superar os desafios desta etapa.

À toda a minha família, principalmente aos meus pais, Dácio e Giceia, que sempre me apoiaram e me incentivaram, mostrando que eu era capaz mesmo quando eu não acreditava em mim.

Às amigadas que o mestrado me proporcionou – Anna Luiza, Dalmon, Lara, Mariana, Matheus e Rodolpho. Foi muito bom dividir esse tempo com todos vocês, principalmente no período antes da pandemia, onde dividíamos risadas e frustrações todos os dias na nossa salinha do LEMAC, além do nosso cafezinho na cantina. Todos vocês ajudaram a deixar essa caminhada mais leve. À Mari, principalmente, que já era minha amiga desde o ensino médio e dividiu todos os momentos possíveis comigo durante esse tempo, compartilhando choros, risadas, carregando muitos quilos de brita e areia e desmoldando inúmeros corpos de prova.

À professora Geilma Lima Vieira, minha orientadora, pela confiança no meu trabalho, pela orientação e por todos os ensinamentos divididos neste período.

Aos servidores e funcionários da UFES que de alguma forma passaram pelo meu caminho, como os professores do PPGEC, que compartilharam seus conhecimentos conosco nas aulas ou nos encontros pelo laboratório e os técnicos do LEMAC e do LABGEOPAV, que colaboraram durante o desenvolvimento da pesquisa. Agradeço também à Izabela Tavares pela ajuda nos ensaios ambientais.

Aos demais laboratórios que ajudaram nas análises dos resultados da pesquisa – LABPETRO, Laboratório de Microscopia Eletrônica e Microanálise do IFES Campus Vitória e Laboratório Multiusuário de Caracterização Tecnológica do CETEM.

À ArcelorMittal pelo apoio financeiro.

Por fim, a todos que contribuíram para a realização dessa importante conquista, meu muito obrigada.

RESUMO

CARRARETO, Lilian Favarato. **Avaliação de aspectos relacionados à durabilidade de concretos produzidos com resíduos siderúrgicos de Terra de Shredder e pó de FEA.** 2022. 155 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2022.

A utilização de resíduos siderúrgicos como matéria-prima para a construção civil vem sendo estudada ao longo do tempo e tem se mostrado bastante viável. Ao aliar a construção civil ao desenvolvimento sustentável, optar por matérias-primas que são subprodutos de outros setores pode ser uma ótima solução para redução dos impactos ambientais. Diante da grande quantidade de resíduos gerados pelas indústrias siderúrgicas, torna-se necessário o estudo sobre a aplicabilidade desses subprodutos em outros processos produtivos, como, por exemplo, na produção de concretos. Desta forma, esta pesquisa teve por objetivo avaliar o desempenho de concretos produzidos com adição de dois tipos de resíduos – pó de FEA e terra de Shredder – em teores de 3 e 10% e com duas relações água/aglomerante diferentes (0,45 e 0,60). A influência da incorporação dos resíduos separadamente nos concretos foi avaliada por meio dos ensaios de índice de consistência pelo abatimento de tronco de cone, massa específica e teor de ar, absorção por capilaridade, potencial de corrosão das barras de aço inseridas no concreto, altura de penetração de cloretos pelo método colorimétrico e lixiviação de contaminantes. A utilização do resíduo Terra de Shredder mostrou-se um pouco incerta, devido a variação na sua composição química e a presença de matéria orgânica. Apesar de ter reduzido a absorção por capilaridade dos concretos, não teve resultados vantajosos na proteção à corrosão. Já a adição do pó de FEA apresentou bons resultados, reduzindo a absorção por capilaridade, aumentando a proteção à corrosão nos concretos com adição de 10% de resíduo e reduzindo um pouco para os com adição de 3%, porém bem próximos aos resultados dos concretos de referência. Não houve lixiviação de contaminantes em nenhum dos concretos produzidos, mesmo com a presença de metais pesados como chumbo e cromo, o que indica que ocorreu a estabilização de compostos químicos perigosos na matriz cimentícia.

Palavras-chave: Resíduos siderúrgicos; Concreto; Durabilidade; Íons cloreto; Pó de FEA; Terra de Shredder.

ABSTRACT

CARRARETO, Lilian Favarato. **Evaluation of aspects related to the durability of concrete produced with steel waste of Shredder residue and EAF dust.** 2022. 155 f. Dissertation (Master's Degree in Civil Engineering) – Graduate Program in Civil Engineering, Federal University of Espirito Santo, Vitória, 2022.

The use of steelmaking waste as a raw material for construction has been studied over time and has proved to be quite viable. By combining civil construction with sustainable development, opting for raw materials that are by-products from other sectors can be a great solution for reducing environmental impacts. Given the large amount of waste generated by the steel industries, it is necessary to study the applicability of these by-products in other production processes, such as in the production of concrete. In this way, this research aimed to evaluate the performance of concrete produced with the addition of two types of waste – EAF dust 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 residues separately in the concretes was evaluated through the tests of slump test, specific mass and air content, water absorption, corrosion potential, height of chloride penetration by the colorimetric method and leaching of contaminants. The use of Shredder residue proved to be a little uncertain, due to the variation in its chemical composition and the presence of organic matter. Despite having reduced the water absorption of the concrete, it did not have advantageous results in corrosion protection. The addition of EAF dust, on the other hand, showed good results, reducing water absorption, increasing corrosion protection in concretes with the addition of 10% of residue and reducing a little for those with the addition of 3%, but very close to the results of the concretes with no addition. There was no leaching of contaminants in any of the concretes produced, even with the presence of heavy metals such as lead and chromium, which indicates that the stabilization of hazardous chemical compounds in the cement matrix occurred.

Keywords: Steelmaking waste; Concrete; Durability; Chloride ions; EAF dust; Shredder residue.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Processo de produção do aço em usinas semi-integradas e integradas ..	24
Figura 2 - Geração específica de coprodutos e resíduos (kg/t aço bruto).....	25
Figura 3 - Forno elétrico a arco	26
Figura 4 - Etapa de beneficiamento da sucata no triturador Shredder	27
Figura 5 - Difratoograma de raios-x de um tipo de resíduo Terra de Shredder	29
Figura 6 - Morfologia do resíduo de um triturador de sucata semelhante à Terra de Shredder.....	30
Figura 7– Formação do pó de FEA a partir do processo de fabricação do aço.....	31
Figura 8 - Difratoograma de raios-x de um tipo de resíduo pó de FEA	34
Figura 9 – Morfologia de diferentes amostras de pó de FEA	35
Figura 10 - Ilustração de uma célula de corrosão em concreto armado.....	44
Figura 11 - Modelo de vida útil proposto por Tuutti	44
Figura 12 – Programa experimental da pesquisa.....	49
Figura 13 - Esquema de nomenclatura das misturas da pesquisa.....	54
Figura 14 – Geometria dos corpos de prova do ensaio de potencial de corrosão.....	55
Figura 15 - Terra de Shredder (a) e Pó de FEA (b).....	56
Figura 16 – Aglomeração do resíduo pó de FEA durante peneiramento na peneira de 75 µm	57
Figura 17 - Moinho de bolas do LEMAC	58
Figura 18 - Peneiramento da Terra de Shredder e granulometria passante e retida em cada peneira.....	59
Figura 19 – Partículas da Terra de Shredder retidas na peneira de 1,18 mm após peneiramento	59
Figura 20 – Ensaio de massa unitária realizado nos resíduos siderúrgicos.....	62
Figura 21 – Ensaio de determinação da superfície específica Blaine	63
Figura 22 – pHmetro utilizado na identificação do pH dos resíduos.....	64

Figura 23 – Difratorômetro utilizado no ensaio de caracterização mineralógica dos resíduos	64
Figura 24 – Equipamento utilizado no ensaio de microscopia eletrônica de varredura	65
Figura 25 – Curva de granulométrica do agregado miúdo	67
Figura 26 – Avaliação do teor de matéria orgânica do agregado miúdo	67
Figura 27 – Curva granulométrica do agregado graúdo	69
Figura 28 – Ensaio de abatimento de tronco de cone	73
Figura 29 - Diagrama de dosagem do concreto produzido com cimento CPV ARI ...	74
Figura 30 – Betoneira utilizada nas concretagens.....	76
Figura 31 – Avaliação do índice de consistência através da determinação do abatimento do tronco de cone do concreto	77
Figura 32 – Corpos de prova em contato com película de água a 5 ± 1 mm (a) e corpos de prova rompidos após o fim do ensaio (b)	79
Figura 33 – Ciclos de imersão e secagem dos corpos de prova do ensaio de corrosão	80
Figura 34 - Esquema ilustrativo do ensaio de potencial de corrosão (a) e corpo de prova submetido ao ensaio (b)	80
Figura 35 – Modelo de medição das alturas de penetração de cloretos nos corpos de prova prismáticos	82
Figura 36 - Corpo de prova do ensaio de lixiviação	84
Figura 37 – Ensaio de lixiviação de contaminantes nas amostras de concreto.....	84
Figura 38 – Curva granulométrica do resíduo Terra de Shredder	88
Figura 39 – Difratorograma de raios-X do resíduo Terra de Shredder	91
Figura 40 - Microestrutura do resíduo Terra de Shredder desta pesquisa	92
Figura 41 – Curva granulométrica do resíduo Pó de FEA e CP V ARI.....	95
Figura 42 – Difratorograma de raios-X do resíduo pó de FEA	99
Figura 43 – Microestrutura do resíduo pó de FEA desta pesquisa.....	100

Figura 44 – Microestrutura do resíduo pó de FEA do estudo de Souza et al. (2010)	101
Figura 45 – Microestrutura do resíduo pó de FEA do estudo de Machado et al. (2006)	101
Figura 46 – Consistência pelo abatimento do tronco de cone dos concretos produzidos com Terra de Shredder	104
Figura 47 – Abatimento de tronco de cone dos concretos produzidos com Terra de Shredder.....	105
Figura 48 – Consistência pelo abatimento do tronco de cone dos concretos produzidos com Pó de FEA	106
Figura 49 – Abatimento de tronco de cone dos concretos produzidos com pó de FEA	108
Figura 50 – Massa específica e teor de ar aprisionado dos concretos com adição de Terra de Shredder	109
Figura 51 – Massa específica e teor de ar aprisionado dos concretos com adição de pó de FEA	109
Figura 52 – Absorção média dos concretos com adição de Terra de Shredder e pó de FEA	111
Figura 53 – Gráfico do efeito isolado da variação do percentual de resíduo Terra de Shredder sobre a média dos resultados de absorção capilar	113
Figura 54 – Gráfico do efeito isolado da variação do percentual de resíduo pó de FEA sobre a média dos resultados de absorção capilar	114
Figura 55 – Gráfico do efeito isolado da variação do ciclo (idade) sobre a média dos resultados de potencial de corrosão dos concretos com adição de Terra de Shredder	117
Figura 56 – Gráfico do efeito isolado da variação da relação a/c sobre a média dos resultados de potencial de corrosão dos concretos com adição de Terra de Shredder	118
Figura 57 – Gráfico do efeito da interação entre o ciclo, a relação a/c e o %resíduo sobre o potencial de corrosão dos concretos com adição de Terra de Shredder....	119

Figura 58 – Gráfico do efeito isolado da variação do ciclo (idade) sobre a média dos resultados de potencial de corrosão dos concretos com adição de pó de FEA	121
Figura 59 – Gráfico do efeito isolado da variação do percentual de resíduo sobre a média dos resultados de potencial de corrosão dos concretos com adição de pó de FEA	122
Figura 60 – Gráfico do efeito isolado da variação da relação a/c sobre a média dos resultados de potencial de corrosão dos concretos com adição de pó de FEA	123
Figura 61 – Gráfico do efeito da interação entre a idade (ciclo) e o percentual de resíduo sobre o potencial de corrosão dos concretos com adição de pó de FEA ...	124
Figura 62 – Gráfico do efeito da interação entre a idade (ciclo) e a relação a/c sobre o potencial de corrosão dos concretos com adição de pó de FEA.....	125
Figura 63 – Gráfico do efeito da interação entre o percentual de resíduo e a relação a/c sobre o potencial de corrosão dos concretos com adição de pó de FEA	126
Figura 64 – Gráfico do efeito isolado da variação da relação a/c sobre a média dos resultados de altura de penetração de cloretos nos concretos com adição de Terra de Shredder.....	130
Figura 65 – Superfícies dos concretos com adição de Terra de Shredder aspergidas com o indicador químico AgNo3.....	131
Figura 66 – Gráfico do efeito isolado da variação do percentual de resíduo sobre a média dos resultados de altura de penetração de cloretos nos concretos com adição de pó de FEA	133
Figura 67 – Gráfico do efeito isolado da variação da relação a/c sobre a média dos resultados de altura de penetração de cloretos nos concretos com adição de pó de FEA	133
Figura 68 – Superfícies dos concretos com adição de pó de FEA aspergidas com o indicador químico AgNO ₃	134
Figura 69 – Resultados do ensaio de resistência à compressão axial para as misturas com Terra de Shredder	139
Figura 70 – Resultados do ensaio de resistência à compressão axial para as misturas com Pó de FEA	139

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Variáveis da pesquisa	51
Quadro 2 - Matriz experimental do pó de FEA e da terra de Shredder	53
Quadro 3 - Siglas das misturas da pesquisa	54
Quadro 4 - Processo de beneficiamento dos resíduos siderúrgicos	60
Quadro 5 - Ensaios e métodos utilizados na caracterização dos resíduos	61

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição química de um tipo de resíduo Terra de Shredder	30
Tabela 2 – Propriedades físicas do pó de FEA de acordo com a literatura.....	32
Tabela 3 – Composição química do resíduo Pó de FEA.....	33
Tabela 4 - Ensaio de caracterização do agregado miúdo	66
Tabela 5 - Ensaio de caracterização do agregado graúdo	68
Tabela 6 - Caracterização do CP V - ARI.....	70
Tabela 7 – Determinação do teor ideal de argamassa para o traço intermediário (m = 5,0).....	73
Tabela 8 – Traços unitários em massa dos concretos produzidos.....	75
Tabela 9 - Probabilidade de ocorrer despassivação da armadura de acordo com o tipo de eletrodo	81
Tabela 10 – Padrões cumulativos U1 e U2 da NEN 7345.....	86
Tabela 11 – Resultado da caracterização do resíduo Terra de Shredder	87
Tabela 12 – Diâmetros do resíduo Terra de Shredder e do CP V ARI.....	88
Tabela 13 – Composição química do resíduo Terra de Shredder	90
Tabela 14 – Resultado da análise dos extratos lixiviado e solubilizado do resíduo Terra de Shredder.....	93
Tabela 15 – Resultado da caracterização do resíduo pó de FEA	94
Tabela 16 – Composição química do resíduo pó de FEA	97
Tabela 17 – Resultado da análise dos extratos lixiviado e solubilizado do resíduo pó de FEA	102
Tabela 18 – Análise de Variância da absorção por capilaridade dos concretos com adição de Terra de Shredder.....	112
Tabela 19 – Análise de Variância da absorção por capilaridade dos concretos com adição de pó de FEA.....	114

Tabela 20 – Zona de probabilidade de corrosão para o eletrodo de cobre/sulfato de cobre	115
Tabela 21 – Análise de Variância do potencial de corrosão dos concretos com adição de Terra de Shredder	116
Tabela 22 – Análise de Variância do potencial de corrosão dos concretos com adição de pó de FEA	120
Tabela 23 – Altura média da penetração de cloretos nos concretos produzidos com Terra de Shredder	128
Tabela 24 – Análise de variância das alturas de penetração de cloretos dos concretos com adição de Terra de Shredder	129
Tabela 25 – Altura média da penetração de cloretos nos concretos produzidos com pó de FEA	132
Tabela 26 – Análise de variância das alturas de penetração de cloretos dos concretos com adição de pó de FEA	132
Tabela 27 – Lixiviação acumulada nos concretos produzidos com adição de Terra de Shredder.....	135
Tabela 28 – Lixiviação acumulada nos concretos produzidos com adição de pó de FEA	137

LISTA DE SIGLAS E ABREVIações

A/C – Relação água/cimento

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ANOVA – Análise de variância

ASTM – American Society for Testing and Materials

CETEM – Centro de Tecnologia Mineral

CP V ARI - Cimento Portland de Alta Resistência Inicial

DRX – Difração de Raios X

FEA – Forno Elétrico a Arco

FRX – Fluorescência de Raios X

IAB – Instituto Aço Brasil

IFES – Instituto Federal do Espírito Santo

IPT/EPUSP – Instituto de Pesquisa Tecnológica/ Escola Politécnica da Universidade de São Paulo

LEMAC – Laboratório de Ensaios e Materiais de Construção

PNRS – Política Nacional de Resíduos Sólidos

PPGEC – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil

UFES – Universidade Federal do Espírito Santo

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	18
1.1	JUSTIFICATIVA	20
1.2	OBJETIVOS	21
1.2.1	Geral	21
1.2.2	Específicos	21
1.3	ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO.....	22
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	23
2.1	O SETOR SIDERÚRGICO BRASILEIRO	23
2.2	GERAÇÃO DE RESÍDUOS NAS USINAS SEMI-INTEGRADAS	26
2.2.1	Terra de Shredder	28
2.2.2	Pó do despoejamento do forno elétrico a arco	31
2.3	APLICAÇÃO DOS RESÍDUOS TERRA DE SHREDDER E PÓ DE FEA NA CONSTRUÇÃO CIVIL	35
2.3.1	Terra de Shredder	36
2.3.2	Pó do despoejamento do forno elétrico a arco	38
2.4	ASPECTOS GERAIS SOBRE A DURABILIDADE DE CONCRETOS FRENTE À AÇÃO DE ÍONS CLORETO	40
2.4.1	Considerações iniciais	40
2.4.2	Durabilidade do concreto de cimento Portland	41
2.4.3	Corrosão das armaduras em concreto armado por ação de íons cloreto 42	
3	ABORDAGEM METODOLÓGICA	47
3.1	REVISÃO DE LITERATURA	47
3.2	PROGRAMA EXPERIMENTAL.....	47
3.3	PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL.....	50
3.3.1	Variáveis da pesquisa	50

3.3.2	Planejamento Fatorial	51
3.3.3	Nomenclatura das misturas.....	54
3.3.4	Corpos de prova	55
3.4	MATERIAIS.....	56
3.4.1	Resíduos siderúrgicos	56
3.4.2	Agregado Miúdo	66
3.4.3	Agregado Graúdo	68
3.4.4	Cimento	69
3.4.5	Água.....	70
3.5	MÉTODOS	70
3.5.1	Dosagem experimental dos concretos	71
3.5.2	Propriedades dos concretos no estado fresco.....	75
3.5.3	Propriedades dos concretos no estado endurecido	78
3.5.4	Avaliação da lixiviação de contaminantes	83
3.6	ANÁLISE DOS RESULTADOS	86
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	87
4.1	CARACTERIZAÇÃO DO RESÍDUO TERRA DE SHREDDER	87
4.1.1	Caracterização física	87
4.1.2	Caracterização química.....	89
4.1.3	Caracterização mineralógica	91
4.1.4	Caracterização microestrutural	92
4.1.5	Caracterização ambiental	92
4.2	CARACTERIZAÇÃO DO RESÍDUO PÓ DE FEA.....	93
4.2.1	Caracterização física	94
4.2.2	Caracterização química.....	96
4.2.3	Caracterização mineralógica	99
4.2.4	Caracterização microestrutural	100

4.2.5	Caracterização ambiental	102
4.3	ENSAIOS NO ESTADO FRESCO	103
4.3.2	Massa específica e Teor de ar aprisionado.....	108
4.4	ENSAIOS DE DURABILIDADE NO ESTADO ENDURECIDO.....	110
4.4.1	Absorção por capilaridade.....	110
4.4.2	Potencial de corrosão	115
4.4.3	Espectroscopia por indução colorimétrica com aspersão de AgNO3 128	
4.5	AVALIAÇÃO DA LIXIVIAÇÃO DE CONTAMINANTES	135
4.5.1	Lixiviação de contaminantes nos concretos produzidos com adição de Terra de Shredder	135
4.5.2	Lixiviação de contaminantes nos concretos produzidos com adição de Pó de FEA	137
4.6	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL	138
5	CONCLUSÃO E CONSIDERAÇÕES FINAIS	141
5.1	CONCLUSÕES SOBRE O RESÍDUO TERRA DE SHREDDER	141
5.2	CONCLUSÕES SOBRE O RESÍDUO PÓ DE FEA.....	143
5.3	SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS	144
	REFERÊNCIAS.....	146

1 INTRODUÇÃO

O desenvolvimento econômico acelerado e a demanda cada vez maior nos dias atuais por produtos dos mais variados tipos ocasionam uma produção industrial em larga escala nos diversos setores do mercado, gerando, como consequência, uma enorme quantidade de resíduos sólidos que não possuem descarte adequado e acabam se tornando passivos ambientais (NIDHEESH; KUMAR, 2019).

Um dos maiores desafios relacionados ao desenvolvimento sustentável na atualidade é a preservação do meio ambiente e a conservação dos recursos naturais. Para que isso seja possível, é necessário reduzir e até limitar o consumo de recursos não renováveis, desenvolvendo matérias-primas alternativas, de modo a minimizar desperdícios e reduzir os custos e problemas ambientais associados à geração e deposição de lixo em aterros ou na natureza (GURSEL; MARYMAN; OSTERTAG, 2016).

O setor siderúrgico é de grande importância para a economia global e é considerado um setor de elevado impacto ambiental, que gera grandes quantidades de resíduos durante o seu processo produtivo, além de também ser responsável pela geração de uma grande quantidade de emissões atmosféricas. Devido a este fato, as legislações que envolvem o assunto têm se tornado cada vez mais rigorosas, obrigando estas indústrias a assumirem posições mais sustentáveis, que gerem menor impacto ambiental e desenvolvam novas tecnologias para o reaproveitamento de resíduos (CARVALHO; MESQUITA; ARAÚJO, 2015).

Em 2010, no Brasil, ocorreu um marco histórico para o setor de resíduos sólidos com a promulgação da Lei 12.305 que instituiu a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), a qual foi regulamentada pelo decreto nº 7404 de 2010. A PNRS determina diretrizes e metas para a gestão dos resíduos sólidos, priorizando a não geração e, caso haja a geração, que seja em menor quantidade, optando pela reutilização ou reciclagem e, em último caso, a disposição final em aterros industriais ou sanitários (BRASIL, 2010).

Niedheesh e Kumar (2019) afirmam que, de 2005 a 2015, a demanda global por aço aumentou em aproximadamente 44% e tem aumentado cada vez mais. Com isso, o aumento na quantidade de resíduos gerados no processo produtivo também aumenta drasticamente. No Brasil, somente em 2017, do total de aço bruto produzido pelas

indústrias siderúrgicas, foram gerados cerca de 60% de resíduos e coprodutos (IAB, 2018). Isso implica na necessidade de uma gestão eficiente desses materiais, aumentando sua capacidade de reciclagem e reuso, o que estimula a busca por novos mercados que sejam capazes de absorvê-los, trazendo vantagens tanto para o setor que gera quanto para o que recebe os resíduos.

Mesmo com o cenário de pandemia causado pelo vírus SARS-CoV-2, que resultou em baixas na produção de aço principalmente no segundo bimestre de 2020, foi possível observar a partir do segundo semestre uma demanda de aço maior que aquela exigida nos primeiros meses do ano, chegando em janeiro de 2021 com a maior produção desde janeiro de 2019, indicando uma retomada do mercado e a consequente geração de resíduos (IAB, 2021).

Outro setor de considerável importância é a construção civil, que possui grande impacto na economia global, além de ser um dos maiores consumidores de energia e materiais, quando comparado a outros setores. Além disso, os danos ao meio ambiente causado pela extração de matérias-primas, geração de gases de efeito estufa e disposição inadequada de resíduos geram esgotamento de recursos naturais, danos à saúde humana, contaminação de solos, água e ar (GALÁN-ARBOLEDAS et al., 2017).

Por ser um setor que absorve resíduos dos mais variados setores, a construção civil torna-se importante no processo de reaproveitamento de resíduos siderúrgicos. A incorporação de subprodutos industriais em matrizes cimentícias como o concreto tem ganhado relevância ao longo do tempo, criando novas alternativas de materiais de construção, reduzindo custos com matérias-primas do concreto e até mesmo melhorando as propriedades deste concreto, além de dar uma destinação mais adequada aos resíduos (AL-ZAID; AL-SUGAIR; AL-NEGHEIMISH, 1997).

No entanto, ao incorporar resíduos siderúrgicos em concretos, ressalta-se a importância de estudos aprofundados sobre o comportamento deste material ao longo da sua vida útil. A avaliação das propriedades relacionadas com a durabilidade deste material é fundamental para garantir a sua integridade ao longo do tempo. Além disso, pelo fato de muitos resíduos apresentarem compostos perigosos em sua composição química, é necessário analisar a lixiviação de contaminantes no concreto produzido, de modo a verificar se poderá causar danos à saúde humana e ao meio ambiente ou se haverá o encapsulamento dos contaminantes pelo concreto.

1.1 JUSTIFICATIVA

A geração de grandes quantidades de resíduos pelas indústrias siderúrgicas, além de provocar impactos ambientais, também traz problemas como lotação de aterros e gera custos com a manutenção destes (CAETANO, 2016). Além disso, alguns desses resíduos podem ser de natureza perigosa ou não inerte, necessitando de aterros especiais e mais seguros para sua disposição, o que aumenta ainda mais os custos associados a eles.

A fim de reduzir os impactos ambientais acarretados pelo setor siderúrgico e promover uma gestão eficiente dos resíduos, a introdução de resíduos siderúrgicos na construção civil torna-se viável pois além de transformá-los em matéria-prima alternativa, também reduz os impactos gerados pela sua disposição inadequada no meio ambiente.

Porém, a maior parte dos estudos atuais está direcionada para a análise das propriedades mecânicas do concreto, sendo que as propriedades relacionadas com a durabilidade são de grande importância e devem ser igualmente avaliadas, pois a deterioração do concreto, que causa a perda da durabilidade, pode acarretar riscos à segurança estrutural. A exigência da produção de materiais duráveis vem do fato de que os custos relacionados à manutenção de estruturas de concreto são altos, além de também haver a preocupação com a sustentabilidade e conservação dos recursos naturais.

É importante salientar que, devido ao fato de o Brasil apresentar uma extensa costa marítima densamente povoada que contempla inúmeras edificações construídas com concreto armado, faz-se necessário avaliar aspectos de durabilidade de concretos produzidos com incorporação de resíduos siderúrgicos, principalmente no que diz respeito à ação de íons cloreto. Este tipo de ambiente possui íons agressivos, como sulfatos e cloretos, que contribuem para aceleração do processo de corrosão de armaduras embutidas em concreto. A velocidade de corrosão nestes locais chega a ser da ordem de 30 a 40 vezes maior do que a que ocorre em atmosfera rural (HELENE, 1986).

Portanto, é necessária uma avaliação aprofundada de como o material irá se comportar quando incorporado em outro meio, como por exemplo uma matriz

cimentícia, e quais benefícios ou desvantagens esta incorporação irá proporcionar ao produto desenvolvido ao longo da sua vida útil e ao meio ambiente.

Desse modo, esta pesquisa visa contribuir com o estudo do comportamento de concretos produzidos com a incorporação de resíduos siderúrgicos, de modo a dar uma destinação mais adequada a eles, trazendo uma alternativa de reaproveitamento destes materiais, avaliando os aspectos ambiental e de durabilidade dos concretos produzidos, com ênfase na ação de íons cloreto, que são agentes de grande severidade e que podem causar sérios danos às estruturas de concreto por corrosão de armaduras.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Geral

O objetivo da dissertação é avaliar a influência da incorporação de dois tipos de resíduos siderúrgicos provenientes de usinas semi-integradas (pó do despoeiramento do forno elétrico a arco e terra de Shredder) sobre aspectos ambientais e de durabilidade nos concretos produzidos.

1.2.2 Específicos

- Caracterizar os resíduos Terra de Shredder e pó de FEA de modo a analisar suas características físicas, químicas, mineralógicas, microestruturais e ambientais;
- Analisar a influência de diferentes teores de adição dos resíduos Terra de Shredder e pó de FEA com duas relações a/c nas propriedades do concreto no estado fresco (ensaios de massa específica e teor de ar e consistência pelo abatimento de tronco de cone);
- Analisar a influência de diferentes teores de adição dos resíduos Terra de Shredder e pó de FEA com duas relações a/c nas propriedades relacionadas com a durabilidade do concreto no estado endurecido (absorção por capilaridade e potencial de corrosão);

- Avaliar qualitativamente a presença de cloretos livres ou frente de contaminação de cloretos nos concretos produzidos para o ensaio de potencial de corrosão, por meio do ensaio de espectroscopia por indução colorimétrica com aspensão do indicador nitrato de prata;
- Avaliar a lixiviação de contaminantes nos concretos produzidos com a adição dos resíduos Terra de Shredder e pó de FEA, de acordo com as normas EA NEN 7375:2004 e EA NEN 7345:1995.

1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

A dissertação está estruturada em seis capítulos.

O Capítulo 1 é introdutório, abordando as considerações iniciais sobre a pesquisa e a sua justificativa, o objetivo geral e os objetivos específicos e a estrutura da dissertação.

O Capítulo 2 apresenta a revisão bibliográfica, com um panorama do setor siderúrgico brasileiro, os resíduos a serem estudados e seus processos produtivos e pesquisas já realizadas sobre a incorporação dos resíduos na construção civil, além de trazer uma abordagem sobre durabilidade do concreto e aspectos relacionados à ação de íons cloreto em estruturas de concreto.

O Capítulo 3 explica sobre a abordagem metodológica utilizada nesta pesquisa para alcançar os objetivos almejados, descrevendo e justificando todas as etapas e os métodos utilizados, a partir do detalhamento do procedimento experimental e os materiais utilizados.

O Capítulo 4 apresenta a análise e discussão dos resultados encontrados por meio dos procedimentos experimentais, de acordo com uma análise estatística e discutindo com outras pesquisas sobre o assunto.

O Capítulo 5 traz as principais conclusões obtidas na pesquisa, por meio da análise dos resultados e também sugestões para trabalhos futuros sobre o assunto.

Ao fim da pesquisa, estão relacionadas as referências bibliográficas e normativas utilizadas durante o desenvolvimento deste trabalho.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 O SETOR SIDERÚRGICO BRASILEIRO

O marco inicial da siderurgia no Brasil se deu com a instalação da Companhia Siderúrgica Nacional (CSN) em Minas Gerais, no ano de 1921. A partir deste evento, o setor siderúrgico passou a ser reconhecido nacionalmente e crescer notoriamente (CARVALHO; MESQUITA; MELO, 2016).

O setor siderúrgico é um dos principais fornecedores de insumos para os mais diversos setores do mercado, entre eles a construção civil. As indústrias siderúrgicas possuem conhecimento tecnológico avançado que permite a fabricação de diversos produtos, que vão desde a transformação do minério de ferro em ferro-gusa até a produção de laminados longos (VIANA, 2017; CARVALHO; MESQUITA; ARAÚJO, 2015).

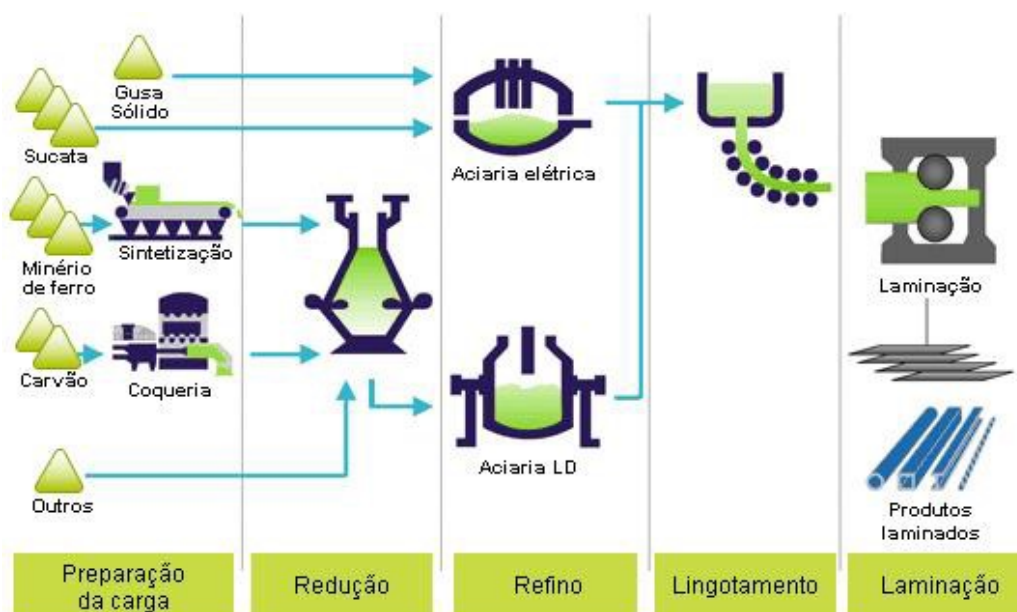
Apenas no ano de 2017, a produção de aço bruto no Brasil foi de 34,4 milhões de toneladas, mantendo-se, neste mesmo ano, na primeira posição no ranking de produção de aço da América Latina. Já no ranking da produção mundial o Brasil ocupa a 9ª posição (IAB, 2018). A situação de pandemia causada pelo vírus da COVID-19 que afetou o mundo inteiro no ano de 2020 provocou quedas na produção brasileira de aço bruto, porém em março de 2021 já foi possível identificar um aumento de 4,1% na produção quando comparado ao mesmo mês do ano anterior, indicando o reaquecimento do setor (IAB, 2021).

A indústria siderúrgica mundial é bastante diversificada quanto ao seu processo produtivo, existindo duas rotas tecnológicas principais: as usinas integradas e as semi-integradas. No Brasil, as indústrias siderúrgicas produzem aço tanto através de usinas integradas quanto em semi-integradas (BRASIL, 2010).

As usinas integradas produzem o aço a partir do minério de ferro nos altos-fornos e utilizam como agente redutor o coque (combustível derivado do carvão mineral). No Brasil, há ainda o diferencial de se utilizar o carvão vegetal no lugar do coque. Nas usinas integradas são executadas as etapas de redução do minério de ferro, refino/aciaria e conformação mecânica/laminação em uma mesma unidade industrial. Cerca de 70% da produção mundial de aço é de responsabilidade da rota integrada a coque (IAB, 2018; CARVALHO; MESQUITA; MELO, 2016).

Já as usinas semi-integradas foram criadas com o intuito de minimizar o impacto ambiental gerado pelas usinas integradas, eliminando algumas etapas da produção do aço. Neste tipo de planta não há a etapa de redução do minério de ferro, que emite grandes quantidades de CO₂ na atmosfera, de modo que a operação acontece em duas fases apenas: refino e laminação. Portanto, o processo inicia na aciaria. Geralmente as aciarias elétricas (fornos elétricos a arco) são alimentadas com sucata de aço e ferro-gusa sólido. Devido ao fato de utilizar sucata, este tipo de rota de produção reduz o consumo de matérias-primas não renováveis e as emissões de CO₂ (IAB, 2017). A Figura 1 ilustra o processo de produção de aço nas duas rotas de produção, sendo a primeira referente às usinas semi-integradas e a segunda às usinas integradas.

Figura 1 - Processo de produção do aço em usinas semi-integradas e integradas



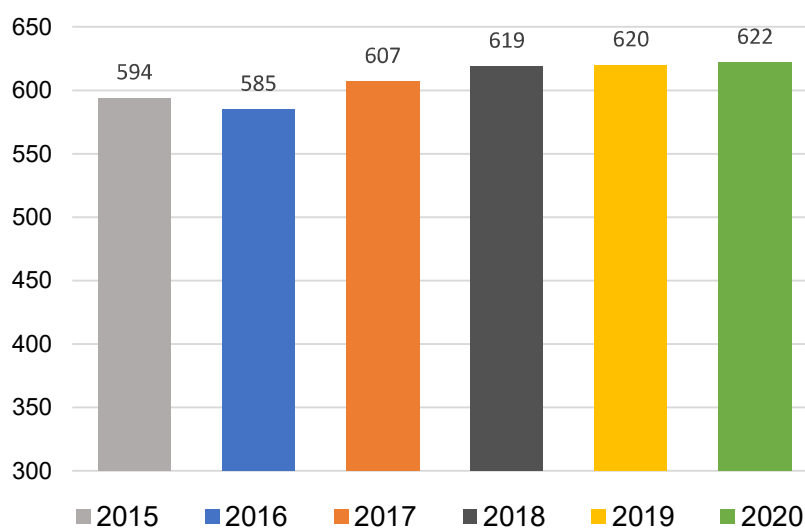
Fonte: IAB (2018).

No entanto, a atividade siderúrgica gera grandes quantidades de resíduos em seu processo produtivo, tanto na rota integrada quanto na semi-integrada. De acordo com o Instituto Aço Brasil (2018), a geração destes resíduos vai desde a agregados siderúrgicos de alto-forno e de aciaria (40% e 27%, respectivamente), pós e finos (7%), lamas (6%), a outras categorias que não foram identificadas.

A Figura 2 ilustra a geração específica de coprodutos e resíduos no Brasil em kg/tonelada de aço bruto nos últimos anos. Percebe-se que, mesmo dentro de um

cenário de pandemia no qual as indústrias siderúrgicas tiveram suas atividades reduzidas, no ano de 2020 a geração de coprodutos e resíduos foi maior do que nos anos anteriores, ou seja, há uma tendência de aumento na geração de resíduos, indicando uma necessidade de aplicação desse material que não seja o descarte em aterros.

Figura 2 - Geração específica de coprodutos e resíduos (kg/t aço bruto)



Fonte: Adaptado de IAB (2021).

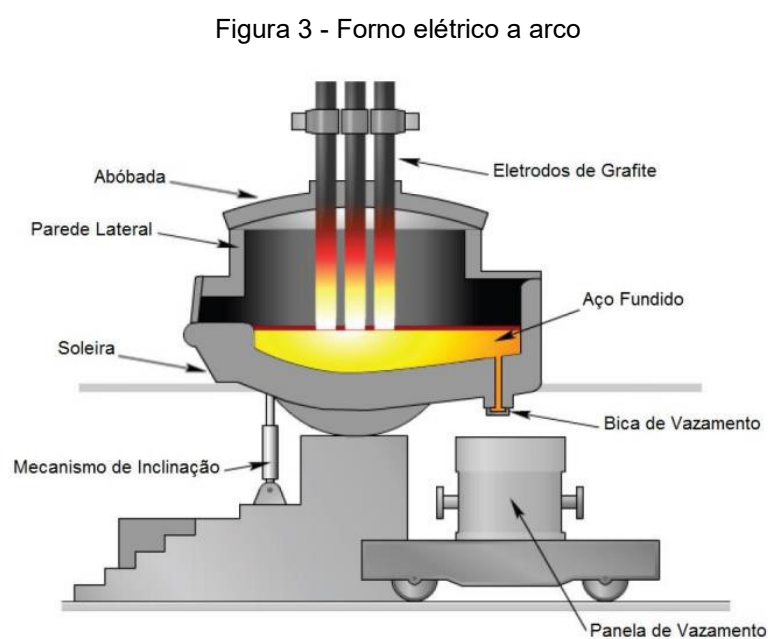
Os coprodutos são os resíduos gerados no processo siderúrgico para o qual foram criadas tecnologias que permitem o seu reaproveitamento, podendo ser utilizado posteriormente pela própria indústria ou por outro setor, de maneira ambientalmente adequada (IAB, 2018). Há, inclusive, uma diretiva da União Europeia (European Union, 2008) que define que um resíduo pode ser considerado um coproduto caso apresente uso certo em outro ciclo produtivo; se puder ser usado diretamente sem outro processamento além da prática industrial normal; se for produzido como parte integrante de um processo produtivo; e se seu uso for legal.

Considerando a grande quantidade de resíduos e coprodutos gerados nos últimos anos, devem ser tomadas providências para que seja encontrada uma solução para o reaproveitamento desses materiais, de modo que estes não se tornem passivos ambientais.

Os resíduos gerados pela indústria siderúrgica podem ser de diversos tipos e provenientes de diversas etapas da fabricação do aço. Podem resultar do processamento das matérias-primas, como a redução do minério de ferro, da etapa de refino, entre outras (BRASIL, 2010).

2.2 GERAÇÃO DE RESÍDUOS NAS USINAS SEMI-INTEGRADAS

Nas usinas semi-integradas as etapas de produção do aço se resumem em refino e laminação. A produção do aço é obtida por meio da reciclagem de aço proveniente de outros processos produtivos ou equipamentos e veículos em fim de vida em fornos elétricos a arco, como mostrado na Figura 3 (BRASIL, 2017).

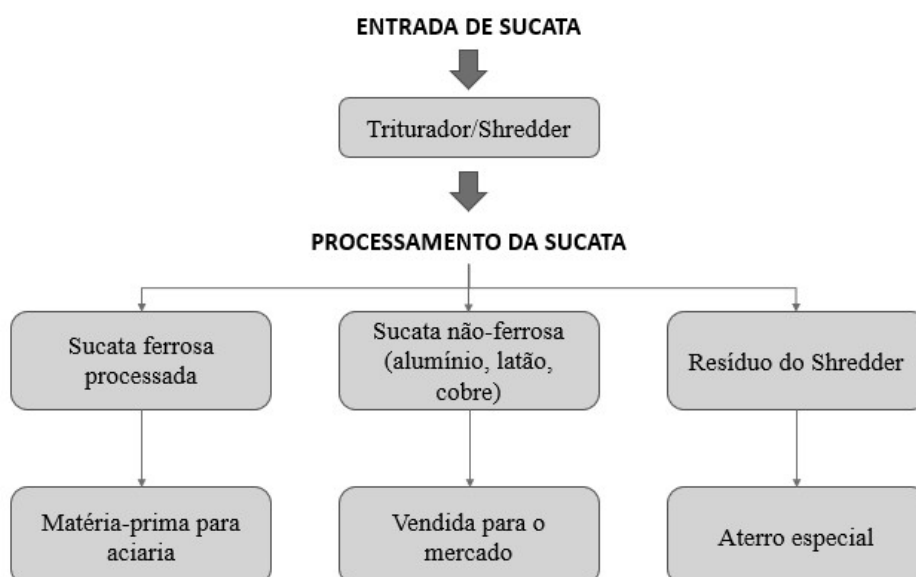


Fonte: Rosentino Jr. (2014).

As matérias-primas para alimentação do forno elétrico a arco são geralmente o ferro-gusa sólido, sucata metálica e ferro-esponja. Neste processo de produção do aço, o forno elétrico a arco é alimentado com sucata ferrosa e alguns aditivos, como cal. A fusão da sucata se dá pela formação de um arco elétrico entre eletrodos de grafite e a sucata, o que eleva a temperatura e permite a ocorrência da fusão, formando um banho de aço que segue para a etapa de refino primário (ARAÚJO, 2014).

Antes de ser utilizada como carga para o forno elétrico a arco, a sucata ferrosa passa por um processo de beneficiamento através de um triturador conhecido como Shredder. Após o processamento, a sucata ferrosa processada é utilizada como matéria-prima para a etapa da aciaria; a sucata não-ferrosa, quando tem viabilidade econômica, é vendida para o mercado; e o restante, que não possui valor agregado, é chamado de resíduo de Shredder e necessita de aterros especiais para sua disposição final. A Figura 4 ilustra resumidamente a etapa de beneficiamento da sucata no triturador Shredder.

Figura 4 - Etapa de beneficiamento da sucata no triturador Shredder



Fonte: Adaptado de Figueiredo (2016).

Neste tipo de usina há a geração de diversos resíduos, como o pó de despoeiramento do forno elétrico a arco (pó de FEA), pó do despoeiramento do forno de panela (FPAN), escória do forno elétrico a arco, impurezas da sucata ou resíduos da Shredder (Fluff de Shredder e Terra de Shredder), carepa de aço, entre outros (BATISTA, 2014).

A ArcelorMittal – fornecedora dos dois resíduos a serem estudados nesta pesquisa – afirma que a geração dos resíduos pó de FEA, proveniente da unidade de Piracicaba, e Terra de Shredder, proveniente da unidade de Iracemápolis, é de aproximadamente 3,5 e 3 mil toneladas por mês, respectivamente (ARCELORMITTAL TUBARÃO, 2019).

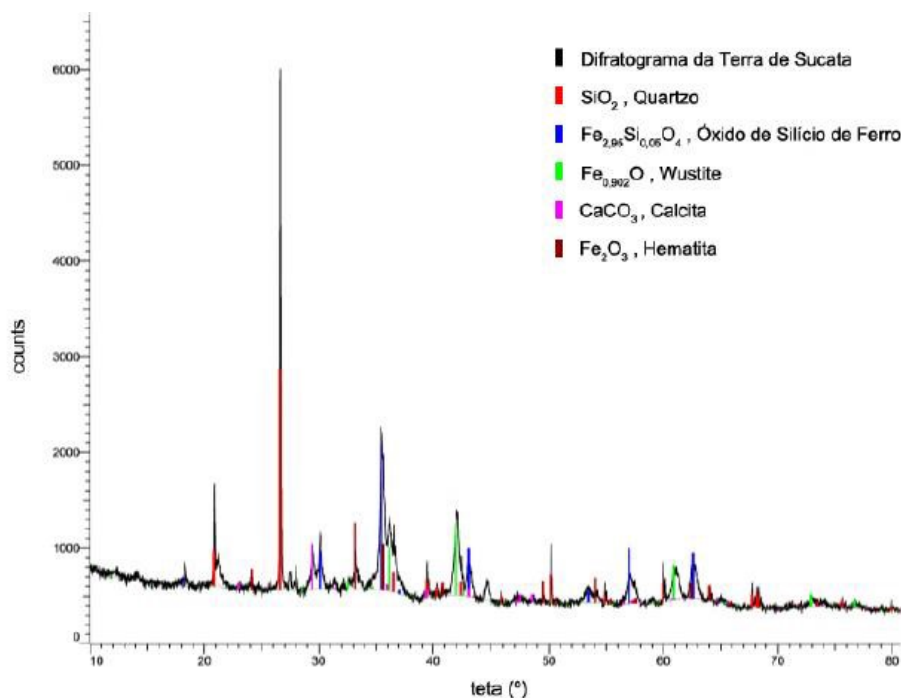
2.2.1 Terra de Shredder

A Terra de Shredder é proveniente do processamento de sucatas utilizadas no processo de fabricação do aço em usinas semi-integradas. Nesse tipo de usina utiliza-se sucata de ferro e aço para alimentar o forno elétrico a arco. Geralmente esta sucata é formada, em sua maior parte, por veículos em fim de vida, além de conter também geladeiras, fogões e outros tipos de sucatas da linha branca (CÂMARA, 2017).

Porém, antes de alimentar o forno, há o beneficiamento dessa sucata, no qual os metais ferrosos são utilizados como matéria-prima para fabricação do aço e os resíduos não metálicos que sobram são chamados de resíduos da Shredder, que podem ser divididos em Fluff e Terra de Shredder (BATISTA, 2014). O processamento da sucata é feito através de um triturador conhecido como Shredder, que dá o nome ao resíduo a ser abordado nesta pesquisa. A Terra de Shredder é mais densa que o Fluff e possui aspecto de solo, com materiais de pequena granulometria como areia, pós, rochas e grande quantidade de vidro. No ano de 2016, foram geradas aproximadamente 74 mil toneladas do resíduo da Shredder em uma única usina semi-integrada no Brasil (CÂMARA, 2017); e desse total, aproximadamente 50% compõem a fração Terra de Shredder e os demais 50% são a fração Fluff da Shredder (BASTISTA, 2014).

Estudos realizados por Siviero et al. (2017) mostraram que o resíduo Terra de Shredder é um material de grande heterogeneidade, variando principalmente devido ao tipo de sucata utilizado. A partir de um difratograma de raios X, foi possível identificar fases cristalinas na amostra ensaiada, como o quartzo (SiO_2), a hematita (Fe_2O_3), calcita (CaCO_3), wustita (FeO) e óxido de silício e ferro, como mostra a Figura 5.

Figura 5 - Difratoograma de raios-x de um tipo de resíduo Terra de Shredder



Fonte: Siviero et al. (2017).

Ao serem entregues em centros de reciclagem, os veículos em fim de vida que se transformam em sucata para alimentar os fornos elétricos a arco passam por um processo de despoluição, onde são retirados óleos lubrificantes, fluidos, baterias, pneus, entre outros componentes que não são de interesse para a formação da sucata metálica para a produção do aço (CAETANO, 2016).

Em sua composição, o resíduo Terra de Shredder, ao contrário do Fluff, apresenta grande proporção de finos (40 a 60% do total do resíduo), que podem ser formados por terra, areia e materiais moídos pela Shredder, além de diversos materiais de granulometria maior, como plástico, borracha, metais não recuperados, vidro, madeira, tecido e até mesmo fiação elétrica. A composição do material varia muito de acordo com a sucata que alimenta o triturador (MANCINI et al., 2014).

A Tabela 1 apresenta a composição química de uma amostra do resíduo Terra de Shredder em duas frações granulométricas diferentes, caracterizado por Siviero et al. (2017).

Tabela 1 - Composição química de um tipo de resíduo Terra de Shredder

Teor por Fração	Fe	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	ZnO	MgO	Mn	P	S	TiO ₂	K ₂ O	Na ₂ O
d<3mm (%)	49,4	18,1	6,6	8,2	1,0	3,6	0,7	0,1	0,1	0,6	0,2	0,6
d<840µm (%)	48,4	20,7	7,9	7,2	1,8	3,5	0,6	0,1	0,1	0,6	0,3	0,6

Fonte: Siviero et al. (2017).

Apesar de ser considerado como a parte não metálica dos resíduos provenientes da Shredder, o resíduo Terra de Shredder apresenta grande quantidade de ferro em sua composição, como mostrado na Tabela 1, devido ao seu processo de geração no qual alguns metais acabam não sendo recuperados no beneficiamento e reaproveitados na produção de aço, se tornando parte do resíduo.

Câmara (2017) mostra em seu estudo a análise de diferentes frações granulométricas de um resíduo do triturador Shredder de uma indústria siderúrgica. A morfologia do material da fração menor que 20 mm, equivalente ao resíduo Terra de Shredder apresentado nesta pesquisa, é mostrada na Figura 6. É possível perceber uma morfologia variável do resíduo e com um aspecto rugoso dos grãos.

Figura 6 - Morfologia do resíduo de um triturador de sucata semelhante à Terra de Shredder



Fonte: Câmara (2017).

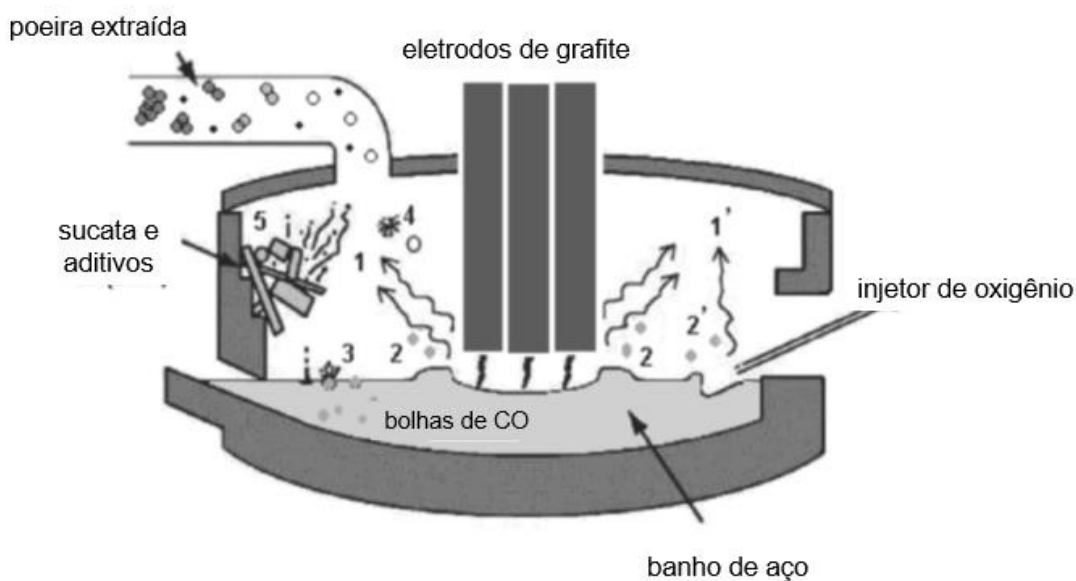
Geralmente este material não possui uma destinação adequada e, especialmente na Europa, onde a produção desse tipo de resíduo é em grande proporção, a disposição é feita principalmente em aterros, devido à complexidade e heterogeneidade da sua matriz, o que gera problemas ambientais de grande impacto, como a lixiviação de compostos perigosos (COSSU; LAI, 2015). Portanto, é necessário avaliar alternativas de reaproveitamento deste material.

2.2.2 Pó do despoeiramento do forno elétrico a arco

O pó do despoeiramento do forno elétrico a arco (pó de FEA) é um resíduo gerado na forma de um pó muito fino durante o processo de produção de aço nas usinas semi-integradas, no forno elétrico a arco (MASLEHUDDIN et al., 2011).

Quando a sucata ferrosa que alimenta os fornos elétricos é derretida no seu interior, há a formação de materiais voláteis, contendo metais pesados, que são oxidados e se solidificam, formando um pó fino que é aspirado por tubos de arrefecimento e coletado por filtros de manga ou precipitadores eletrostáticos, dando origem ao pó de FEA (STATHOPOULOS et al., 2013; ARAÚJO, 2014), como ilustrado na Figura 7.

Figura 7– Formação do pó de FEA a partir do processo de fabricação do aço



Fonte: Adaptado de Fares et al. (2016).

De modo geral, o pó de FEA é resultado de uma série de fenômenos que ocorrem no forno elétrico a arco, como a emissão de partículas devido à explosão de bolhas no banho de aço, as transformações físico-químicas no processo de ascensão dessas partículas e o transporte das partículas no sistema de extração de fumaça (GUÉZENNEC et al., 2005).

Os estudos apontam que este resíduo é um material de elevada densidade, com massa específica variando entre 4,08 e 4,44 g/cm³ (SOUZA et al., 2010; METZ, 2016; BREHM, 2004) e estes valores elevados são atribuídos à sua composição química, que apresenta grandes quantidades de zinco e ferro.

Com relação à granulometria, em sua maior parte o pó de FEA é composto por partículas finas, abaixo de 20 µm, geralmente esféricas. Acredita-se que esse formato esférico venha da projeção de gotículas líquidas que ocorrem devido à explosão de bolhas de monóxido de carbono durante o processo de redução do carbono do banho de aço (GUÉZENNEC et al., 2005). Magalhães et al. (2019) observaram a existência de duas frações principais para o resíduo, sendo uma muito fina, na faixa de 3,8 µm e outra fração fina, com partículas de diâmetro aproximado de 26 µm. E apesar dessas frações finas principais, existe também a presença de partículas maiores, com diâmetros de até 478 µm.

A Tabela 2 apresenta uma comparação entre os valores de massa específica e tamanho médio de partículas do resíduo pó de FEA encontrados em outras pesquisas já realizadas com o mesmo material.

Tabela 2 – Propriedades físicas do pó de FEA de acordo com a literatura

Referências	Massa específica (g/cm³)	Tamanho médio das partículas (µm)
Brehm (2004)	4,44	0,83
Machado et al. (2006)	-	1,88
Metz (2016)	4,21	0,69
Souza et al. (2010)	4,08	-
Fares et al. (2016)	-	3,00

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Estudos mostram a superfície específica deste material variando entre 7310 e 8800 cm²/g (SOUZA et al., 2010; MAGALHÃES et al., 2019), valores relativamente elevados quando comparados ao cimento, que está entre 3450 e 5460 cm²/g (MEHTA; MONTEIRO, 2014), o que pode influenciar nas taxas de hidratação quando o material é adicionado em uma matriz cimentícia.

O pó de FEA apresenta em sua composição química elevadas quantidades de óxido de zinco (cerca de 21%) e óxido de ferro (cerca de 50%), devido à sucata utilizada no processo de fabricação do aço e também contém quantidades significativas de outros óxidos, como cálcio, magnésio, silício e alguns até perigosos, como cádmio, chumbo e cromo (MASLEHUDDIN et al., 2011), como mostra a Tabela 3.

Tabela 3 – Composição química do resíduo Pó de FEA

Parâmetro	Magalhães et al. (2017)	Fares et al. (2016)	Lozano-Lunar et al. (2019)	Maslehuddin et al. (2011)
Na₂O	-	5,80	2,7 - 3,2	2,6
MgO	2,52	6,20	1,6 - 1,7	2,3
Al₂O₃	-	1,21	1,0	0,70
SiO₂	3,89	3,96	2,8 - 3,3	2,38
K₂O	-	-	2,0 - 2,2	1,70
CaO	13,32	14,10	3,0 - 4,8	9,39
Cl	2,06	-	5,0 - 11,9	-
Cr₂O₃	0,82	-	0,5 - 0,6	-
CuO	0,26	-	-	0,06
Fe₂O₃	35,92	41,30	29,9 - 31,8	33,6
MnO	3,92	0,95	2,6 - 3,1	1,8
CdO	0,09	-	-	<0,01
P₂O₅	-	-	0,2 - 0,3	0,13
PbO	1,72	-	2,3 - 2,9	1,31
SO₃	1,07	0,92	2,3 - 2,6	0,57
NiO	0,44	-	-	0,01
TiO₂	-	-	-	0,09
ZnO	31,34	10,01	34,2 - 38,3	10,7

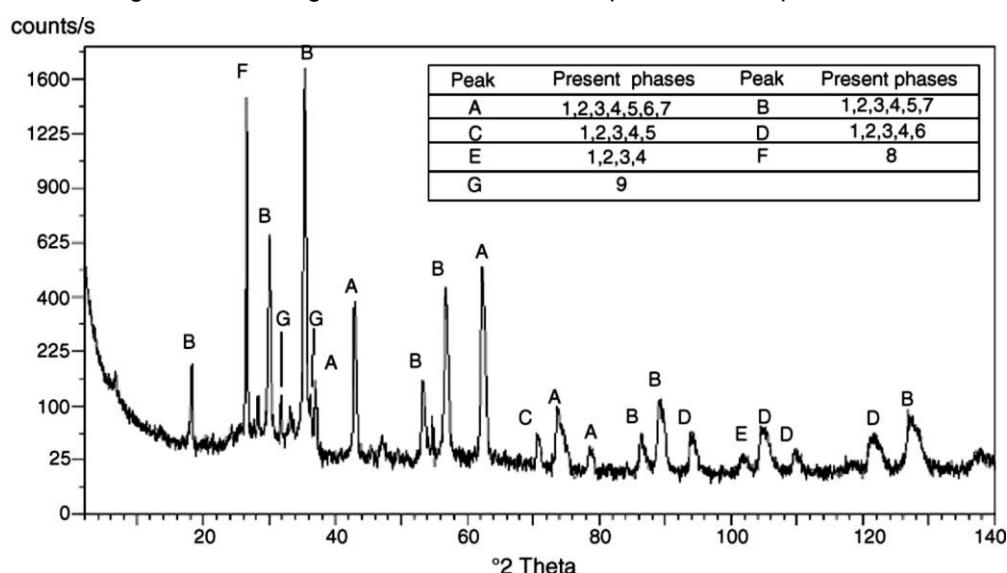
Fonte: Elaborado pela autora (2021).

A grande quantidade de zinco encontrada no pó de FEA deve-se ao uso de sucata ferrosa com grandes quantidades de aço galvanizado, ou seja, aços que possuem uma camada protetora de zinco contra a corrosão. Ao ser colocada no forno elétrico, ocorre a fusão da sucata e o zinco volatiliza junto com outros materiais, depositando-se junto às partículas de poeira (LANZERSTORFER, 2018).

É possível que dentro de uma mesma planta industrial a composição química do resíduo possa variar, pois depende de vários fatores como, por exemplo, as condições de funcionamento do forno, a carga do forno elétrico a arco e os procedimentos utilizados. Portanto, antes de dar uma destinação a este resíduo, é importante avaliar sua composição química, de modo a analisar o risco ambiental envolvido na sua utilização (SIMONYAN; ALPATOVA; DEMIDOVA, 2019).

A literatura aponta que o pó de FEA é um resíduo predominantemente cristalino, como ilustrado no difratograma da Figura 8 e, entre as fases presentes, o ferro se manifesta principalmente como Magnetita (Fe_3O_4) e o zinco é encontrado nas fases Zincita ou óxido de zinco (ZnO) e Franklinita (ZnFe_2O_4). Também são encontrados outros elementos na forma de óxidos simples (MACHADO et al., 2006).

Figura 8 - Difratograma de raios-x de um tipo de resíduo pó de FEA

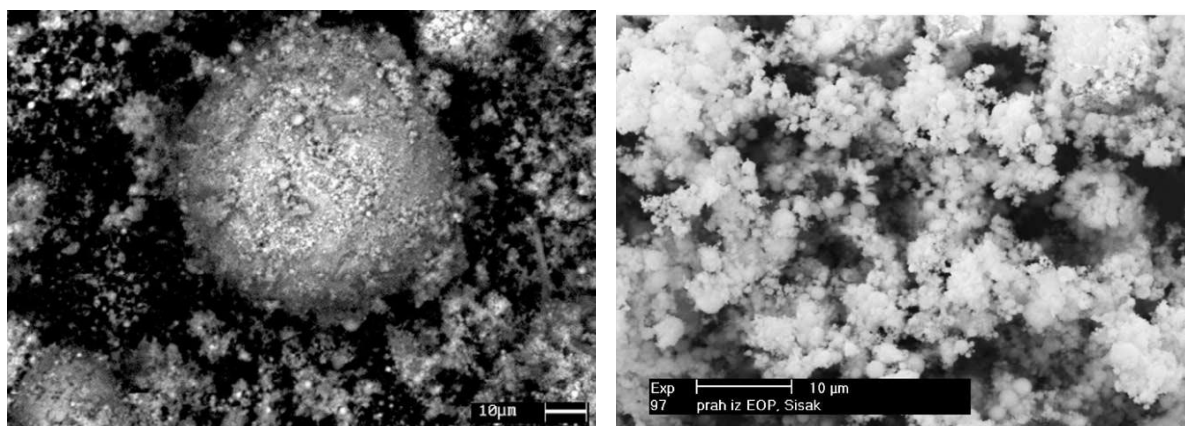


1. Franklinite - ZnFe_2O_4 (PDF: 22-1012)
2. Magnetite - Fe_3O_4 (PDF: 11-0614)
3. Magnesium-ferrite - MgFe_2O_4 (PDF: 17-0465)
4. Chromite - FeCr_2O_4 (PDF: 34-0140)
5. Calcium - magnetite - $\text{Ca}_{0,15}\text{Fe}_{2,35}\text{O}_4$ (PDF: 46-0291)
6. Periclase - MgO (PDF: 45-0946)
7. Manganese oxide - Mn_3O_4 (PDF: 13-0162)
8. Quartz - SiO_2 (PDF: 05-0490)
9. Zincite - ZnO (PDF: 36-1451)

Fonte: Machado et al. (2006).

Com relação à morfologia do resíduo, o material é formado por partículas geralmente esféricas, na forma de aglomerados (SOFILIC et al., 2004; SOUZA et al., 2010; MAGALHÃES et al., 2017), como pode ser observado na Figura 9.

Figura 9 – Morfologia de diferentes amostras de pó de FEA



Fonte: Magalhães et al. (2017) e Sofilic et al. (2004).

Aproximadamente 15 a 20 kg de poeira são gerados a cada tonelada de aço produzida no forno elétrico à arco. Por conter metais pesados lixiviáveis, como zinco e cromo, o pó de FEA é considerado como um material perigoso pela Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (EPA) (SOUZA et al., 2010; MASLEHUDDIN et al., 2011). O pó de FEA está inserido na classificação de resíduo perigoso, Classe I, de acordo com a NBR 10004 (ABNT, 2004).

Mesmo diante da afirmativa de que o pó de FEA é um resíduo perigoso por apresentar em sua composição elementos como chumbo, cádmio e cromo, mais da metade do resíduo gerado é depositado em aterros, enquanto a outra parte é utilizada para recuperação de zinco, o que depende da concentração deste composto no material, a fim de melhor aproveitá-lo (LANZERSTORFER, 2018).

2.3 APLICAÇÃO DOS RESÍDUOS TERRA DE SHREDDER E PÓ DE FEA NA CONSTRUÇÃO CIVIL

No mundo, pesquisas vêm sendo desenvolvidas ao longo do tempo sobre a incorporação de resíduos dos mais variados setores na indústria da construção civil.

Nidheesh e Kumar (2019) mostram em sua pesquisa estudos realizados sobre o uso de resíduos como material de mistura do clínquer e também como adições ou substituições em matrizes cimentícias, como por exemplo pó de mármore, cinzas volantes provenientes da queima do carvão mineral, cinzas de incineração de resíduos sólidos urbanos, lama vermelha da indústria de alumínio, resíduos de telha cerâmica, entre outros, obtendo resultados positivos em suas aplicações.

Ao incorporar resíduos siderúrgicos em concretos é importante salientar que a qualidade deste material de construção é alcançada por meio da seleção de materiais adequados e uma dosagem eficiente. Ao incorporar resíduos siderúrgicos em uma matriz cimentícia é necessário avaliar questões de durabilidade no material produzido, pois uma estrutura de concreto deve ser projetada visando um bom desempenho e uma longa vida útil. O uso de resíduos pode melhorar as propriedades do concreto, promovendo a eficiência do material frente à ação de agentes agressivos, como por exemplo os íons cloreto, e também melhorar aspectos como a resistência mecânica; assim como pode também ser danoso ao concreto produzido.

2.3.1 Terra de Shredder

O resíduo Terra de Shredder não tem uso consagrado na construção civil, devido a sua heterogeneidade tanto na composição quanto na distribuição granulométrica, portanto são poucos os estudos relacionados a aplicação deste material na indústria da construção.

A separação mecânica das frações granulométricas do resíduo gerado pelo triturador Shredder é um processo complicado e alguns autores já pesquisaram as possibilidades de incorporar a fração fina em misturas asfálticas, compósitos e concretos. Porém não foram obtidos grandes avanços, sendo necessárias maiores investigações sobre este assunto (VERMEULEN et al., 2011).

Rossetti, Di Palma e Medici (2006) estudaram um processo para produzir agregados para concreto leve a partir das frações não metálicas dos resíduos gerados pelo triturador Shredder, ou seja, o Fluff e a Terra de Shredder. Foram realizados vários processos experimentais para que fosse possível granular o material, por meio do uso de um ligante (cal ou cimento), cinzas volantes e um agente densificador, para então ser utilizado como agregado. Os resultados mostraram que o concreto produzido com

esse agregado pode ser utilizado para uma função não estrutural, promovendo então uma possibilidade de reaproveitamento da fração fina não metálica dos resíduos enquanto a fração mais grossa pode ser enviada para incineração, devido ao seu alto potencial calorífico.

Analisou-se também a incorporação da fração menor que 2 mm do resíduo Terra de Shredder na fabricação de blocos cerâmicos estruturais em uma fábrica de cerâmica vermelha, concluindo que esta incorporação é viável quando feita junto à massa cerâmica, pois os blocos confeccionados atenderam a todos os requisitos de norma. Além disso, também foi feita a análise de lixiviação e solubilização da massa cerâmica com incorporação de resíduo, classificando-a como não perigosa e não inerte (FIGUEIREDO, 2016).

Caetano, Schalch e Pablos (2020) utilizaram frações do resíduo Terra de Shredder para produzir blocos de concreto para pavimentação, utilizando o resíduo junto ao agregado miúdo, substituindo 20% da areia natural na mistura. A absorção de água dos blocos aos 90 dias manteve-se dentro dos limites da norma brasileira e também apresentaram excelentes resultados de resistência à compressão após 1 ano de produção, possibilitando seu uso no tráfego de pedestres e veículos leves. Resultados do ensaio de solidificação/estabilização mostraram que os blocos de pavimentação foram classificados como não perigosos e não inertes, pois dos 8 elementos tóxicos presentes no resíduo, 6 foram encapsulados na matriz cimentícia, sendo que os 2 não encapsulados foram o alumínio e o cádmio que também foram encontrados em blocos de concretos tradicionais, sem o resíduo.

Não há indícios de estudos que avaliem a incorporação do resíduo Terra de Shredder totalmente moído como matéria-prima de algum produto da construção civil; há apenas estudos sobre o uso da fração fina proveniente do triturador Shredder (ROSSETTI; DI PALMA; MEDICI, 2006).

A moagem do resíduo pode garantir certa homogeneidade ao material, que possui granulometria variável, o que estimula a busca por novas técnicas que permitam o seu reaproveitamento. O uso deste material moído na construção civil como incorporação em matrizes cimentícias pode ser uma nova estratégia de uso para o resíduo, evitando sua deposição em aterros e garantindo a estabilização de compostos químicos perigosos. Porém, depende de estudos mais aprofundados sobre o comportamento deste material na matriz ao longo do tempo.

2.3.2 Pó do despoeiramento do forno elétrico a arco

Por ser considerado um resíduo perigoso Classe I pela NBR 10004 (ABNT, 2004), o pó de FEA necessita de tecnologias que permitam o seu reaproveitamento, pois a disposição indevida desse material em aterros pode causar danos à saúde humana e ao meio ambiente. Esse problema pode ser resolvido através da aplicação de técnicas de recuperação de alguns óxidos presentes no material ou então por meio da estabilização de metais pesados (SOFILIC et al., 2004).

No Brasil, o processo de recuperação de metais pesados no pó de FEA não costuma ser utilizado, pois não há uma grande viabilidade econômica devido à baixa porcentagem de metais pesados que possuem valor comercial no material. Desse modo, as pesquisas são direcionadas ao uso do pó de FEA na construção civil na produção de clínquer ou incorporado em matrizes cimentícias, com o objetivo de dar uma destinação final adequada ao resíduo, promover a estabilização dos metais pesados e melhorar as propriedades mecânicas do material produzido (VARGAS; MASUERO; VILELA, 2006).

Um fato preponderante sobre a utilização do pó de FEA na produção de argamassas e concretos é a questão do atraso na hidratação do cimento quando este material é adicionado à matriz cimentícia. Alguns autores apontam que durante a hidratação do cimento, o óxido de zinco (ZnO) presente no resíduo forma hidróxido de zinco ($Zn(OH)_2$) devido ao elevado pH da pasta e este atua como uma camada impermeável revestindo as partículas C_3S , inibindo a hidratação. Com o decorrer do tempo e aumento das concentrações de Ca^{+2} e OH^- , o hidróxido de zinco se dissocia e é transformado em um composto cristalino, o hidrozincato de cálcio ($CaZn_2(OH)_6 \cdot 2H_2O$), promovendo a retomada do processo de hidratação da pasta (MAGALHÃES et al., 2017; SOUZA et al., 2010).

Já outros autores afirmam que a camada impermeável é na verdade o próprio hidrozincato de cálcio, não havendo um consenso sobre o modelo de hidratação (AL-NEGHEIMISH et al., 2021; FARES et al., 2021). Em ambas teorias, o retardo da hidratação é justificado pela formação de uma película de baixa permeabilidade em torno do cimento anidro, que dificulta o transporte de íons e água e, assim, desacelera o processo de hidratação. O consumo de hidróxido de cálcio e de íons da solução pelo zinco para a formação de produtos hidratados como o hidrozincato de cálcio atrasa a

precipitação do hidróxido de cálcio na matriz e o desenvolvimento do C-S-H, o que afeta o endurecimento da pasta (FARES et al., 2021).

Foi identificado que o pó de FEA atuou como retardador de pega na produção de concretos e melhorou as propriedades mecânicas em idades mais avançadas ao ser utilizado em teores de adição entre 3% e 25% em massa, o que torna seu uso eficaz em concretos aplicados em locais de temperaturas elevadas (FARES et al., 2016; VARGAS; MASUERO; VILELA, 2006). Além disso, houve uma maior resistência à penetração de íons cloreto em pastas de cimento com a adição de até 3% do resíduo devido ao preenchimento dos poros pelas partículas finas do pó de FEA, favorecendo a redução da permeabilidade (FARES et al., 2016).

Souza et al. (2010) avaliaram a estabilização do pó de FEA em concretos a fim de evitar a lixiviação de compostos perigosos como cádmio e cromo e, além disso, analisaram propriedades mecânicas e de durabilidade dos concretos produzidos. Com este estudo, concluiu-se que, com teores de adição entre 10 e 20%, além de um atraso no tempo de pega do concreto, assim como estudado por Magalhães et al. (2019), houve também um aumento na resistência à compressão axial dos concretos com adição do pó de FEA. Ademais, os concretos também apresentaram uma maior resistência à penetração de cloretos devido ao efeito de preenchimento da matriz por conter grãos muito finos e também pelo fato de as partículas servirem como ponto de nucleação para a hidratação do cimento, densificando a matriz cimentícia. Por fim, o ensaio de lixiviação de contaminantes demonstrou que nenhum composto excedeu os limites de norma, concluindo que o concreto possui capacidade de estabilizar os elementos potencialmente tóxicos presentes no pó de FEA.

Maslehuddin et al. (2011) avaliaram o uso de 2% do resíduo pó de FEA em relação à massa de cimento na produção de diferentes traços de concreto, dos quais um deles era composto somente de cimento Portland e outros dois produzidos com cimento Portland e adições minerais – um com sílica ativa e outro com cinza volante. Concluíram que em todos os concretos produzidos com o uso do pó de FEA, tanto o puro quanto os com as adições minerais, ocorreu uma diminuição da absorção de água entre 11,3 e 13,9% com relação ao concreto de referência devido à incorporação do material. Além disso, ao avaliar o potencial de corrosão nos concretos produzidos com pó de FEA notou-se um atraso no início da corrosão das barras de aço do concreto, indicando que o uso do material pode aumentar a vida útil das estruturas

de concreto armado, devendo-se tomar cuidado com o aumento do tempo de pega do concreto e o aumento do conteúdo de chumbo no material produzido devido à composição química do material.

Rubio-Cintas et al. (2019) ao avaliarem a adição de um resíduo como o pó de FEA ao concreto em proporções de 5, 10 e 15% em massa observaram um aumento da resistência mecânica dos concretos produzidos com relação ao concreto convencional. Como o resíduo é classificado como perigoso, também foi feita uma análise de lixiviação de contaminantes nos concretos produzidos por meio da técnica de solidificação/estabilização, podendo notar que, apesar de todos os elementos químicos perigosos que compõem o resíduo, apenas os valores de cromo foram um pouco maiores do que os do concreto convencional.

Diante do exposto, é visto que o pó de FEA vem sendo bastante estudado para aplicação na indústria da construção civil. Porém, é sempre necessário avaliar se há, de fato, a estabilização dos elementos contaminantes presentes neste resíduo quando incorporados em matrizes cimentícias por meio de um ensaio de lixiviação de contaminantes, visto que a composição do resíduo pode variar numa mesma planta industrial (BUZIN; HECK; VILELA, 2017). Além disso, é importante verificar o teor de incorporação ótimo a fim de que propicie maior durabilidade aos concretos produzidos.

2.4 ASPECTOS GERAIS SOBRE A DURABILIDADE DE CONCRETOS FRENTE À AÇÃO DE ÍONS CLORETO

2.4.1 Considerações iniciais

Ao utilizar resíduos siderúrgicos como matéria-prima na fabricação de concretos, é fundamental avaliar o comportamento do material ao longo de sua vida útil, assim como seu comportamento mecânico e os aspectos de durabilidade relacionados a ele.

Mehta e Monteiro (2008) afirmam que 40% dos recursos da construção civil estão relacionados a reparos e manutenções corretivas de estruturas de concreto e 60% a novas construções, ou seja, um valor muito alto gasto com problemas que poderiam ser evitados se fossem desenvolvidos estudos mais aprofundados sobre os aspectos de durabilidade dos concretos antes de serem produzidos. Desse modo, é importante

ressaltar que, ao produzir concretos, tenha-se como objetivo a produção de um material durável, de modo a evitar a geração de resíduos e o desperdício de materiais.

Diante disso, faz-se necessário conhecer os principais fatores que influenciam na durabilidade dos concretos, como por exemplo os íons cloretos, foco deste estudo, de modo a evitar danos nas estruturas, reduzir os gastos com manutenção e o desperdício de materiais.

2.4.2 Durabilidade do concreto de cimento Portland

O concreto de cimento Portland é, atualmente, o material estrutural de construção mais importante e, no Brasil, é o mais consumido. É composto por cimento, agregados e água, além de também poder conter aditivos e adições minerais. A proporção dos constituintes do concreto busca permitir que o material formado atenda às propriedades mecânicas e de durabilidade para as quais foi requerido no estado endurecido, além de garantir trabalhabilidade no estado fresco (HELENE; ANDRADE, 2017).

Ao entrar em contato com a água, o cimento Portland que compõe o concreto se hidrata e, microestruturalmente, forma fases sólidas que são o silicato de cálcio hidratado (C-S-H), que determina propriedades de resistência da pasta; o hidróxido de cálcio (CH ou portlandita) que tem contribuição limitada na resistência devido à sua área superficial mais baixa; e os sulfoaluminatos de cálcio, que possuem papel secundário nas relações microestrutura-propriedades (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

O maior fator de influência nas propriedades de durabilidade do concreto é a permeabilidade deste material, pois a quantidade e o tamanho dos poros na pasta de cimento podem favorecer a passagem de fluidos. Com o aumento do grau de hidratação da pasta, a permeabilidade diminui devido à descontinuidade dos poros (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

O concreto é conhecido por ser um material resistente de vasto uso, de fácil produção e com certas propriedades de durabilidade. Devido a sua grande variedade de aplicação, este material tende a ser exposto a ambientes agressivos, como solos ou subsolos ricos em sulfatos, ambientes marinhos, águas residuais de drenagem,

compostos químicos presentes no ar gerados por indústrias e outros fatores que podem afetar o desempenho das estruturas a longo prazo.

Os compostos químicos deletérios ao concreto presentes em ambientes agressivos ocasionam a troca de íons com a matriz, o que gera alterações na matriz cimentícia, afetando a pasta de cimento, levando à redução das propriedades mecânicas e de durabilidade do material (PALANKAR; RAVI SHANKAR; MITHUN, 2016).

As estruturas de concreto podem sofrer deterioração devido a diversos fatores. Entre eles, o maior problema relacionado a durabilidade é a corrosão das barras de aço do concreto armado devido à ação de agentes agressivos presentes no meio em que a estrutura foi construída, como dióxido de carbono, sulfatos e cloretos (SHI et al., 2012).

A água é considerada o principal meio de transporte de agentes agressivos para o concreto tendo efeito destrutivo devido à conectividade entre os poros presentes na matriz cimentícia. Ela pode penetrar em poros de pequena dimensão e atuar como veículo de transporte de íons agressivos, como os íons cloreto (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

Desse modo, o concreto deve ser projetado e executado de maneira que esteja de acordo com o ambiente ao qual será exposto e a qual função atenderá durante sua vida útil, dando atenção à sua composição, à espessura de cobrimento, à relação água/cimento utilizada, além das técnicas de execução empregadas, a fim de evitar danos que possam reduzir seu desempenho.

2.4.3 Corrosão das armaduras em concreto armado por ação de íons cloreto

O pH da solução dos poros de um concreto de cimento Portland geralmente encontra-se entre 12,5 e 13,5 e, quando em contato com um ambiente ácido, fica em estado de desequilíbrio. O contato com esse meio ácido pode causar a redução da alcalinidade dos poros, desestabilizando os produtos de hidratação da pasta de cimento (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

O pH alcalino propicia a formação de uma camada passiva na superfície das barras de aço embutidas no concreto, como uma espécie de película, protegendo-as da corrosão. Com uma espessura de cobrimento adequada e um concreto com baixa permeabilidade, é esperado que não ocorram problemas associados à corrosão nessa

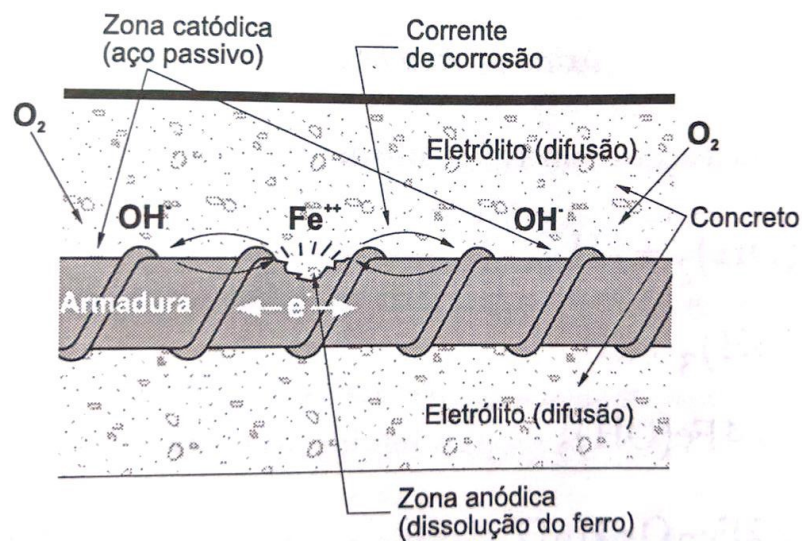
estrutura, pelo menos na teoria. Porém na prática, a exposição a meios altamente agressivos, mesmo quando o concreto é bem executado, pode trazer danos à estrutura associados à corrosão (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

Helene (1986) define a corrosão como um fenômeno no qual ocorre a deterioração de um material, geralmente metálico, através da interação entre o material com o ambiente por meio de uma reação química ou eletroquímica. O processo eletroquímico, que é o mecanismo de corrosão do aço no concreto, acontece na presença de água ou ambiente de elevada umidade e apresenta como produto da corrosão a ferrugem. Para que ocorra a corrosão, é fundamental que haja a presença de um eletrólito, uma diferença de potencial, oxigênio e podem existir agentes agressivos como sulfetos, cloretos, dióxido de carbono, etc. (HELENE, 1986).

A corrosão eletroquímica envolve reações de oxirredução, formando uma pilha eletroquímica, existindo portanto uma região anódica, onde ocorrem reações de oxidação que transformam o material do estado metálico para o estado iônico; uma região catódica, onde ocorrem as reações de redução devido ao consumo dos elétrons gerados na região anódica; um eletrólito, que é a solução condutora de elétrons que abrange as duas regiões; e uma ligação entre essas duas regiões, que geralmente é a própria barra de aço (HELENE, 1986).

Quando inserida em uma peça de concreto, a armadura recebe dupla proteção. Primeiramente há uma proteção física dada pelo revestimento, pois este separa a armadura do contato direto com o meio externo e, segundo, há a proteção química que é promovida pelo alto pH do concreto, que gera uma película de proteção que envolve as barras de aço, formada por uma fina camada de óxidos aderente ao aço (FIGUEIREDO; MEIRA, 2013). Havendo a diferença de potencial entre as regiões anódica e catódica, ocorre o aparecimento de uma corrente elétrica, que propicia a corrosão da barra de aço (MEIRA, 2013). A Figura 10 ilustra a formação de uma pilha eletroquímica ou célula de corrosão no interior do concreto com barra de aço já despassivada.

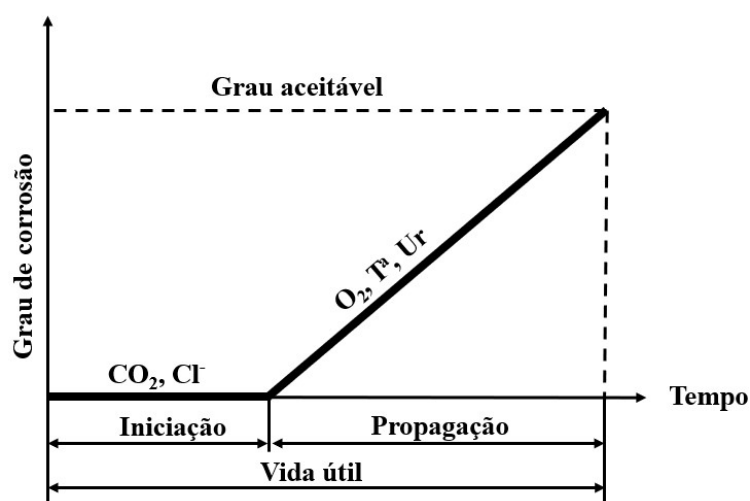
Figura 10 - Ilustração de uma célula de corrosão em concreto armado



Fonte: Cascudo (1997).

O processo de corrosão do aço no concreto é explicado por um modelo de vida útil proposto por Tuutti, em 1982, o qual divide este processo em duas etapas: a iniciação e a propagação, conforme ilustrado na Figura 11. A etapa de iniciação acontece desde o momento da execução da estrutura até o momento em que o agente agressivo (CO_2 , Cl^-) ultrapassa a região de cobertura do concreto e atinge a armadura, promovendo a despassivação. A etapa da propagação é o desenvolvimento da corrosão até que atinja um grau inaceitável do mecanismo (CASCUDO, 1997).

Figura 11 - Modelo de vida útil proposto por Tuutti



Fonte: Adaptado de Cascudo (1997).

Quando o íon cloreto é o agente que inicia a corrosão localizada nas barras de aço, quebrando a película passiva, promovendo uma corrosão localizada, esse tipo de corrosão recebe o nome de corrosão por pites, onde há a formação de micropilhas eletroquímicas, com grande profundidade de corrosão, debilitando a capacidade mecânica do elemento estrutural afetado devido à perda de seção da armadura (CABRAL, 2000).

Além do fato da corrosão do aço, com a ocorrência de perda de seção e diminuição da resistência mecânica, o processo de corrosão das armaduras no concreto também prejudica a funcionalidade do mesmo pois pode provocar o aparecimento de manchas, fissurações e lascamento da superfície de concreto e prejudica a transferência de tensões entre concreto e armadura, comprometendo sua eficiência (CABRAL, 2000).

O processo de corrosão de armaduras devido à ação de íons cloreto no concreto é mais preocupante que o processo de corrosão causado pela carbonatação¹, pois os cloretos que não são consumidos nas reações ficam novamente livres para reagir posteriormente (CABRAL, 2000). A presença de cloretos na mistura do concreto pode ocorrer devido a diversos fatores, como pelo uso de agregados contaminados, pelo uso de água com alto teor de sais ou pela utilização de aditivos contendo cloretos, como, por exemplo, os aceleradores de pega.

O cloreto pode existir de diversas formas no interior da matriz cimentícia, entre elas sob a forma de íons cloretos livres; adsorvidos na estrutura do C-S-H; ou então quimicamente ligados, após a reação com os compostos do cimento como o aluminato de cálcio (C3A), chamados também de cloretos fixos, gerando cloroaluminatos de cálcio ou sal de Friedel ($C_3A \cdot CaCl_2 \cdot 10H_2O$), que não participa do processo de corrosão das armaduras. A atuação dos cloretos é relevante nas armaduras quando este se encontra sob a forma de cloretos livres, pois deste modo ele se difunde pela matriz, contribuindo efetivamente na despassivação e corrosão das armaduras. Haverá sempre uma combinação entre essas três formas de cloretos no concreto; portanto, havendo cloretos combinados, haverá também um teor de cloretos livres, o que pode propagar a corrosão no concreto (CASCUDO, 1997).

¹ A carbonatação do concreto é outra forma comum de despassivação da armadura que ocorre devido à penetração do dióxido de carbono (CO_2) presente no ar sob a forma gasosa no interior do concreto, envolvendo reações químicas com a pasta de cimento hidratada (BAROGHEL-BOUNY; CAPRA; LAURENS, 2014).

O cloreto pode ser transportado para dentro do concreto através dos mecanismos de absorção capilar, difusão iônica, permeabilidade sob pressão e migração iônica. Na maior parte dos casos, os principais mecanismos de transporte são absorção capilar e difusão iônica, sendo que o primeiro se dá nas camadas mais superficiais e o segundo mais no interior do concreto (CASCUDO, 1997).

Um dos parâmetros de grande importância associado à corrosão do concreto armado é a relação água/cimento utilizada durante a dosagem, pois ela define propriedades como a porosidade da pasta de cimento após o endurecimento, chegando até a ser mais significativa do que a espessura de cobrimento utilizada. Com uma relação a/c baixa, há uma redução no volume dos poros e na permeabilidade, que são facilitadores para o processo de corrosão (CASCUDO, 1997).

Como o fenômeno de corrosão dos concretos ocorre com certa frequência e pode causar danos desastrosos às edificações, alguns métodos são empregados com o objetivo de identificar a ocorrência de despassivação do aço, seja por meio da medição da densidade de corrente instantânea de corrosão e do potencial de corrosão, polarização anódica, inspeção visual, análise de perda de massa da barra, entre diversos outros que vem sendo utilizados por estudiosos do assunto ao longo do tempo (MEIRA, 2017). Desse modo, é possível prever danos futuros na estrutura ou encontrar soluções que evitem que o problema ocorra ao longo da vida útil do material.

3 ABORDAGEM METODOLÓGICA

Este capítulo aborda as variáveis existentes na produção deste trabalho, os materiais utilizados e o procedimento detalhado de sua caracterização, dosagem dos concretos, moldagem dos corpos de prova e os principais ensaios realizados durante o desenvolvimento da pesquisa para atingir os objetivos.

3.1 REVISÃO DE LITERATURA

O Portal de Periódicos CAPES/MEC foi utilizado como a principal fonte de obtenção de conteúdo para o referencial teórico desta pesquisa, por meio do uso, principalmente, das bases de dados Science Direct e Web of Science. Além do Portal de Periódicos, também foram utilizadas bases de dados online de instituições de ensino superior, por meio de dissertações de mestrado e teses de doutorado.

3.2 PROGRAMA EXPERIMENTAL

O programa experimental desta pesquisa foi dividido em três etapas: caracterização dos materiais, preparação dos concretos e moldagem dos corpos de prova e realização de ensaios. A Figura 12 apresenta o fluxograma geral do programa experimental da pesquisa.

A etapa de caracterização dos materiais consiste em caracterizar os materiais utilizados na produção dos concretos, que são os dois resíduos em estudo (pó de FEA e Terra de Shredder), o cimento, a areia e a brita.

A segunda etapa compreende a preparação dos concretos. Inicialmente é feita a dosagem para determinação do traço a ser utilizado e, após a produção dos concretos necessários para a pesquisa, são moldados os corpos de prova para realização dos ensaios.

A terceira e última etapa consiste na realização de ensaios no estado fresco, por meio da determinação da consistência pelo abatimento de tronco de cone e da massa específica e teor de ar aprisionado, de acordo com as normas NBR 16889 (ABNT, 2020) e NBR 9833 (ABNT, 2015), respectivamente, e no estado endurecido por meio de ensaios relacionados com a durabilidade como absorção por capilaridade,

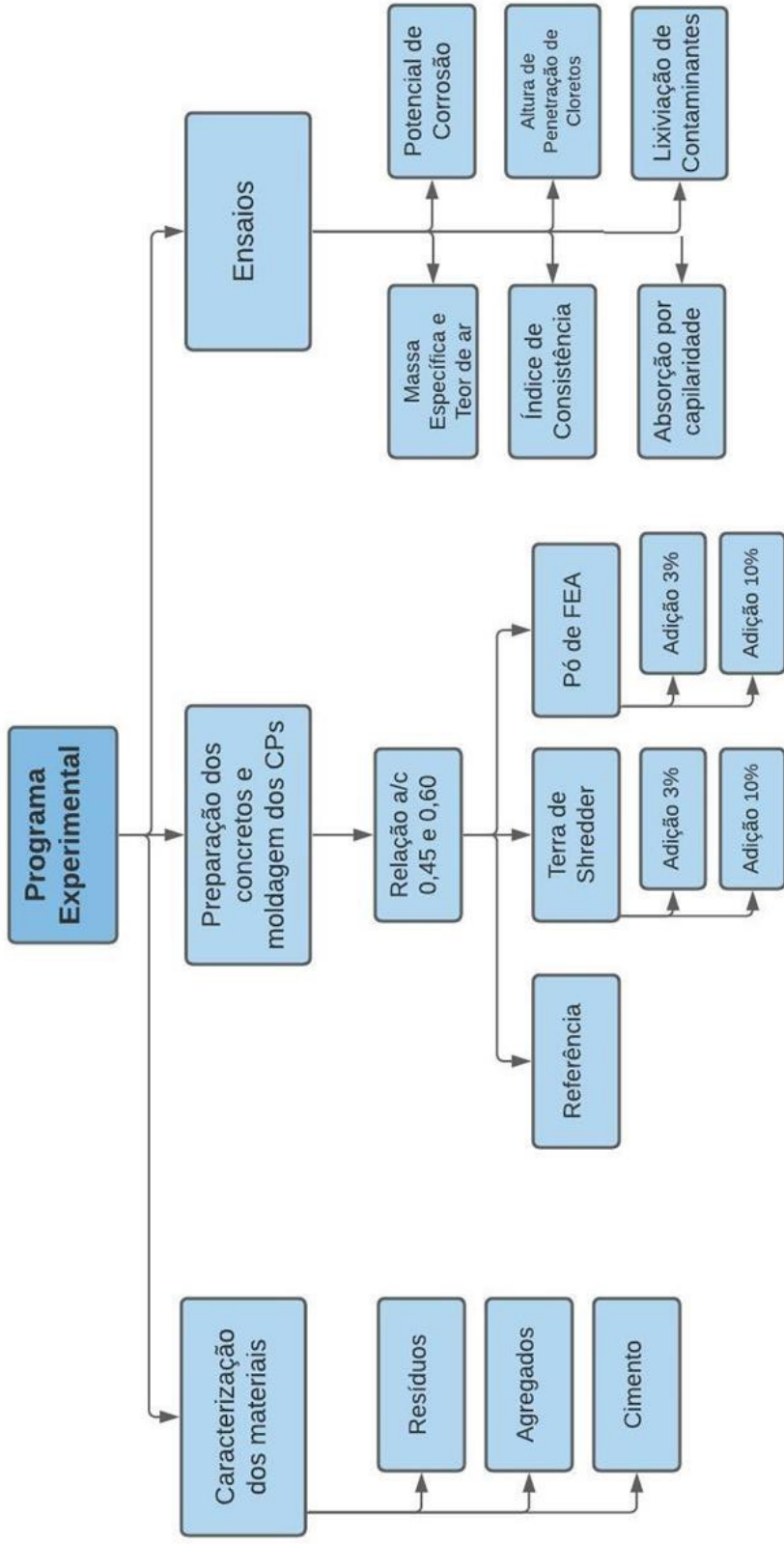
realizado nos concretos aos 91 dias de idade de acordo com a NBR 9779 (ABNT, 2012); potencial de corrosão, realizado a partir dos 28 dias de idade do concreto conforme a ASTM C 876 (2015); e espectroscopia por indução colorimétrica para avaliar a altura de penetração de cloretos, realizado nos concretos após serem submetidos a ciclos de imersão e secagem em solução agressiva no ensaio de determinação do potencial de corrosão.

Além disso também foi realizado o ensaio de lixiviação de contaminantes nos concretos aos 120 dias de idade, de acordo com as normas EA NEN 7375 (NNI, 2004) e EA NEN 7345 (NNI, 1995), a fim de avaliar ambientalmente o comportamento dos resíduos siderúrgicos na matriz cimentícia.

Para a produção dos concretos foram adotadas duas relações água/cimento, com o objetivo de avaliar o comportamento de diferentes teores de água na produção de concretos. As relações a/c adotadas foram de 0,45 e 0,60, a partir da dosagem, considerando os limites das classes de agressividade para concreto armado dispostos na NBR 6118 (ABNT, 2014). O fato de avaliar duas relações a/c torna-se fundamental para esta pesquisa, pois este parâmetro é de grande relevância no contexto de corrosão em concretos armados, governando a porosidade da pasta de cimento (CASCUDO, 1997).

Foram estabelecidos percentuais de adição de 3 e 10% para os dois tipos de resíduo, com base na literatura sobre o pó de FEA, a qual apresentou uma variação de teores entre 2% e 25% (MASLEHUDDIN et al., 2011; SOUZA et al., 2010; FARES et al., 2016; VARGAS; MASUERO; VILELA, 2006), a fim de não afetar demasiadamente endurecimento dos concretos devido a presença de zinco no material, que produz um retardo no tempo de pega. Como as informações sobre o efeito da incorporação da Terra de Shredder em materiais cimentícios são mais escassas, adotou-se o mesmo percentual para este resíduo.

Figura 12 – Programa experimental da pesquisa



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

3.3 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL

A presente pesquisa visa estudar o comportamento de concretos produzidos com diferentes teores de resíduos siderúrgicos provenientes da fabricação do aço. Para alcançar os objetivos da pesquisa, foi definida uma série de fatores relevantes como os experimentos a serem realizados, os dados a serem coletados, quantidade de corpos de prova a serem ensaiados e as idades de ensaio, entre outros que podem influenciar no resultado da pesquisa. O planejamento experimental tem por objetivo definir as variáveis que irão influenciar nos resultados dos ensaios ao longo da pesquisa.

3.3.1 Variáveis da pesquisa

As variáveis do programa experimental são classificadas em variáveis dependentes, independentes e de controle, que podem interferir no resultado final da pesquisa.

As variáveis dependentes, conhecidas também como variáveis de resposta, são aquelas cujo comportamento se quer avaliar em função das oscilações das variáveis independentes e correspondem aos valores a serem explicados ou descobertos. As variáveis independentes são escolhidas intencionalmente, ou seja, manipuladas pelo investigador, a fim de verificar a relação entre suas variações e sua influência nas variáveis dependentes. Já as variáveis de controle não são objetos de estudo, mas podem ter grande influência nas variáveis dependentes e independentes, devendo ser controladas (MARCONI; LAKATOS, 2003). O Quadro 1, a seguir, apresenta as variáveis da pesquisa.

Quadro 1 - Variáveis da pesquisa

TIPO DE VARIÁVEL	VARIÁVEL
DEPENDENTES (respostas)	Índice de consistência (abatimento de tronco de cone)
	Massa específica e teor de ar
	Absorção por capilaridade
	Potencial de corrosão
	Altura de penetração de cloretos
	Lixiviação de contaminantes no concreto
	Resistência à compressão (parâmetro de controle)
INDEPENDENTES	Percentual de adição (0%, 3%, 10%)
	Relação a/c (0,45 e 0,60)
	Idade do concreto
CONTROLE	Resíduos utilizados
	Tipo de cimento (CP V ARI)
	Agregado miúdo
	Agregado graúdo
	Método de dosagem
	Moldagem dos corpos de prova
	Tipo de cura

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

3.3.2 Planejamento Fatorial

Nesta pesquisa será utilizado o Planejamento Fatorial Cruzado ou Multinível para a execução dos ensaios e análise de resultados de cada um dos resíduos em estudo, pois permite a combinação de todas as variáveis em todos os níveis. Esta escolha deve-se à necessidade de analisar todas as possíveis combinações entre os fatores e níveis estudados.

O Quadro 2 ilustra a matriz experimental da pesquisa, apresentando os níveis de relação a/c, níveis de utilização dos resíduos, níveis de idades, quais os ensaios, a quantidade de corpos de prova por ensaio e a quantidade total de corpos de prova a serem produzidos nesta pesquisa.

O cálculo da quantidade de corpos de prova por ensaio foi feito com base nas interações entre os níveis, multiplicando os níveis de relação água/cimento, os níveis de utilização dos resíduos, os níveis de idades e a quantidade de corpos de prova.

O traço de referência (porcentagem de resíduo igual a 0%) foi considerado para o resíduo Pó de FEA somente em função dos cálculos de quantidade de corpos de prova, pois será feito apenas um traço de referência (sem a adição de resíduos) para cada uma das relações a/c, que servirá de referência para todas as outras misturas.

Quadro 2 - Matriz experimental do pó de FEA e da terra de Shredder

Resíduo	Níveis de relação a/c		Níveis de utilização de resíduo		Níveis de idades		Ensaio		Quant. de corpos de prova por ensaio	Total de corpos de prova
	Níveis	Quais	Níveis	Quais	Níveis	Quais	Quais			
Pó de FEA	2	0,45; 0,60	3	0%, 3% e 10%	-	-	Índice de consistência	Amostra no estado fresco	-	
	2	0,45; 0,60	3	0%, 3% e 10%	-	-	Massa específica e teor de ar	Amostra no estado fresco	-	
	2	0,45; 0,60	3	0%, 3% e 10%	1	28 dias	Potencial de Corrosão e Espectroscopia por indução colorimétrica	4	24	
	2	0,45; 0,60	3	0%, 3% e 10%	1	91 dias	Absorção por Capilaridade	3	18	
	2	0,45; 0,60	3	0%, 3% e 10%	1	120 dias	Lixiviação	1	6	
	2	0,45; 0,60	2	3% e 10%	-	-	Índice de consistência	Amostra no estado fresco	-	
Terra de Shredder	2	0,45; 0,60	2	3% e 10%	-	-	Massa específica e teor de ar	Amostra no estado fresco	-	
	2	0,45; 0,60	2	3% e 10%	1	28 dias	Potencial de Corrosão e Espectroscopia por indução colorimétrica	4	16	
	2	0,45; 0,60	2	3% e 10%	1	91 dias	Absorção por Capilaridade	3	12	
	2	0,45; 0,60	2	3% e 10%	1	120 dias	Lixiviação	1	4	
TOTAL DE CORPOS DE PROVA										
									80	

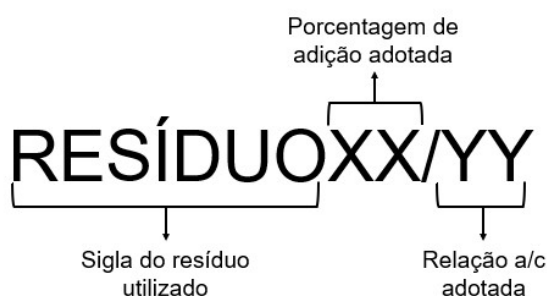
Fonte: Elaborado pela autora (2021).

3.3.3 Nomenclatura das misturas

Pelo fato de haver 10 misturas diferentes no desenvolvimento desta pesquisa, faz-se necessário a criação de uma nomenclatura para cada tipo de mistura que será produzida, contemplando a identificação do tipo de resíduo utilizado, a relação a/c e a porcentagem de adição, de modo a facilitar a identificação da mistura. A nomenclatura segue o modelo apresentado na Figura 13.

Desse modo, a partir do esquema de nomenclatura apresentado, foram desenvolvidas as identificações das misturas a serem produzidas, além dos concretos de referência a serem produzidos com as duas relações a/c, indicadas no Quadro 3.

Figura 13 - Esquema de nomenclatura das misturas da pesquisa



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Quadro 3 - Siglas das misturas da pesquisa

SIGLA	RESÍDUO UTILIZADO	PORCENTAGEM	RELAÇÃO ÁGUA/CIMENTO
REF45	-	0%	0,45
REF60	-	0%	0,60
PF03/45	Pó do forno elétrico a arco (PF)	3%	0,45
PF10/45		10%	
PF03/60		3%	0,60
PF10/60		10%	
TS03/45	Terra de Shredder (TS)	3%	0,45
TS10/45		10%	
TS03/60		3%	0,60
TS10/60		10%	

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

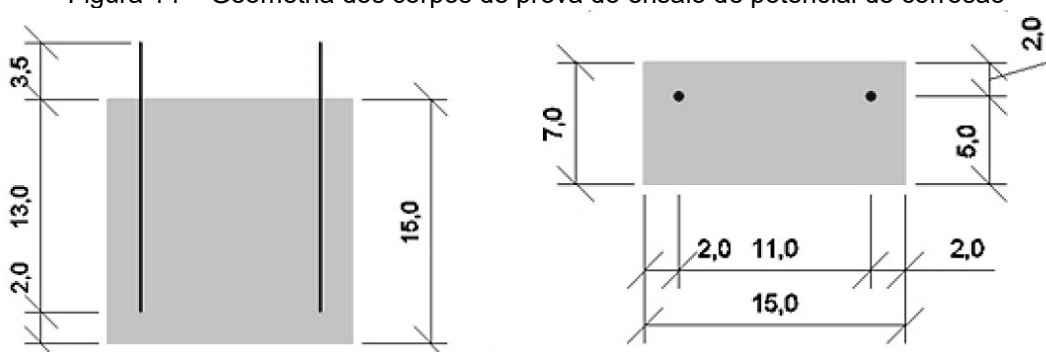
3.3.4 Corpos de prova

Um destaque especial deve ser dado ao tipo de corpo de prova utilizado em cada ensaio realizado durante a pesquisa.

O ensaio de absorção por capilaridade utilizará corpos de prova cilíndricos de 10 cm de diâmetro e 20 cm de altura. Para o ensaio de potencial de corrosão, proposto pela ASTM C 876 (ASTM, 2015), serão utilizados corpos de prova prismáticos, assim como realizado por Dietrich (2015), de dimensões 15x15x7 cm, como mostra a Figura 14. Para cada idade serão produzidos 4 corpos de prova com a inserção de 2 barras de aço CA 50 de \varnothing 6,3 mm, respeitando um cobrimento de 2 cm.

Para o ensaio de espectroscopia por indução colorimétrica serão utilizados os corpos de prova do ensaio de potencial de corrosão, que serão fraturados para a aspensão do indicador nitrato de prata.

Figura 14 – Geometria dos corpos de prova do ensaio de potencial de corrosão



Fonte: Dietrich (2015).

Para a análise ambiental dos concretos, que segue o proposto pela norma holandesa EA NEN 7375 (NNI, 2004), será utilizado um corpo de prova cilíndrico 10x20 cm em todos os traços para cada um dos ensaios, que será cortado em dimensões adequadas ao ensaio.

3.4 MATERIAIS

3.4.1 Resíduos siderúrgicos

Os resíduos utilizados nesta pesquisa são: pó do despoejamento do forno elétrico a arco e Terra de Shredder. O pó do despoejamento do forno elétrico a arco (FEA) e a Terra de Shredder, apresentados na Figura 15, são resíduos provenientes da empresa ArcelorMittal. O pó de FEA é proveniente de uma usina semi-integrada localizada em Piracicaba, São Paulo, e a Terra de Shredder é proveniente de uma unidade de processamento de sucata metálica para abastecer as aciarias elétricas da empresa que está localizada em Iracemápolis, também no estado de São Paulo.

Figura 15 - Terra de Shredder (a) e Pó de FEA (b)



Fonte: Acervo da autora (2021).

Os resíduos foram entregues no Laboratório de Ensaios e Materiais de Construção Civil da Universidade Federal do Espírito Santo (LEMAC – UFES) devidamente acondicionados em baldes vedados, identificados com etiquetas informando que a coleta foi feita de acordo com a NBR 10007 (ABNT, 2004) de amostragem de resíduos sólidos e a data e o local de coleta.

Após o recebimento no LEMAC, os resíduos foram homogeneizados e quarteados conforme NBR NM 27 (ABNT, 2001) para a redução da amostra recebida para realizar a caracterização e os ensaios em laboratório. Após o quarteamento, foram secos em estufa até que se obtivesse massa constante e após o resfriamento foram

aconicionados em sacos plásticos até a realização do beneficiamento e caracterização.

Antes de iniciar a caracterização dos resíduos siderúrgicos foi definido que esses materiais deveriam apresentar finura semelhante à do cimento Portland CP V ARI, utilizado como aglomerante na produção dos concretos desta pesquisa. O resíduo Terra de Shredder, por se tratar de um material heterogêneo e de maior granulometria, necessitou de um procedimento de moagem em moinho de bolas para que atingisse a finura almejada e o pó de FEA, por ser um material em pó, não necessitou da moagem.

Foi estabelecido um parâmetro de finura para que os resíduos pudessem ser utilizados como adição no concreto. No caso da Terra de Shredder, este parâmetro foi utilizado para finalizar o processo de moagem. Inicialmente, adotou-se como parâmetro que os resíduos deveriam apresentar finura menor ou igual a 6% para o material retido na peneira de 75 μm , que é a quantidade recomendada para o CP V ARI na NBR 16697 (ABNT, 2018) de acordo com ensaio normalizado pela NBR 11579 (ABNT, 2013). Durante o processo de agitação da peneira especificado por essa norma, ocorreu uma visível aglomeração dos grãos mais finos dos resíduos, assim como mostrado na Figura 16, impedindo o peneiramento e tornando o ensaio não conclusivo.

Figura 16 – Aglomeração do resíduo pó de FEA durante peneiramento na peneira de 75 μm



Fonte: Acervo da autora (2021).

Portanto, foi adotado como novo parâmetro o ensaio de finura na peneira de 45 μm , recomendado para verificar a finura de materiais pozzolânicos utilizados como adição ao cimento, proposto pela NBR 12653 (ABNT, 2015), pois neste procedimento há a utilização de um dispersante que favorece a separação das partículas sólidas e o ensaio é feito sob um fluxo constante de água. Essa norma estabelece como parâmetro que menos de 20% do material peneirado fique retido na peneira de 45 μm , segundo ensaio realizado através da NBR 15894-3 (ABNT, 2010).

Esse ensaio foi realizado somente para verificar a finura dos resíduos e finalizar a moagem, sem avaliações acerca de atividade pozzolânica. Desse modo, quando o resíduo Terra de Shredder que estava sendo moído alcançou um percentual de material retido menor que 20% como recomenda a norma, o procedimento de moagem foi finalizado; e o resíduo pó de FEA, que já é um material pulverulento, também atingiu este parâmetro. A etapa de moagem mencionada para o resíduo Terra de Shredder foi realizada no moinho de bolas do LEMAC – UFES, ilustrado na Figura 17.

Figura 17 - Moinho de bolas do LEMAC



Fonte: Acervo da autora (2021).

É importante ressaltar que, antes de ser moída, a Terra de Shredder, por ser bastante heterogênea, passou por um peneiramento inicial na peneira de abertura 6,3 mm, como ilustrado na Figura 18, e foi decidido que o material a ser moído seria o passante nessa peneira, descartando-se o retido por ser de granulometria graúda e de grande

heterogeneidade em sua composição. Desse modo, o material passante foi moído em moinho de bolas até atingir o parâmetro mencionado anteriormente.

Figura 18 - Peneiramento da Terra de Shredder e granulometria passante e retida em cada peneira



Fonte: Acervo da autora (2021).

Após a moagem, ainda foi necessário mais uma etapa de peneiramento do resíduo, pois havia a presença de materiais de maior granulometria que não foram moídos no moinho de bolas, como mostra a Figura 19. Portanto, utilizou-se uma peneira de abertura de 1,18 mm para peneirar o material, descartando-se o retido e utilizando-se o passante para a caracterização e produção dos concretos.

Figura 19 – Partículas da Terra de Shredder retidas na peneira de 1,18 mm após peneiramento



Fonte: Acervo da autora (2021).

O Quadro 4 apresenta de maneira resumida o beneficiamento feito para os resíduos e o parâmetro de finura utilizado para finalizar a etapa de moagem. Deve ser

considerado que cada ciclo de moagem do moinho de bolas tem a duração de aproximadamente 2h47min.

Quadro 4 - Processo de beneficiamento dos resíduos siderúrgicos

Resíduos Siderúrgico	Processo	Parâmetro de finura	Tempo de moagem
Terra de Shredder	Peneiramento	Utilizado o material passante na peneira 6,3 mm	2 ciclos (\cong 5h30min)
	Moagem em moinho de bolas	< 20% retido na peneira de 45 μ m	
	Peneiramento	Material moído peneirado na peneira de 1,18 mm	
Pó de FEA	Não houve moagem nem peneiramento	< 20% retido na peneira de 45 μ m	-

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Após o fim do procedimento de moagem e estando os dois resíduos com finura atendendo ao parâmetro estabelecido, os resíduos siderúrgicos foram caracterizados. A etapa de caracterização dos resíduos contemplou a caracterização física, química, mineralógica, microestrutural e ambiental, de modo a identificar as características dos materiais para serem utilizados como adição ao concreto. Os ensaios de caracterização estão ilustrados no Quadro 5.

Quadro 5 - Ensaios e métodos utilizados na caracterização dos resíduos

Propriedades Avaliadas		Método de ensaio
Caracterização física	Massa específica	NBR 16605 (ABNT, 2017)
	Massa unitária	NBR 12127 (ABNT, 2017)
	Finura peneira 75 µm (#200)	NBR 11579 (ABNT, 2012)
	Finura peneira 45 µm (#325)	NBR 15894-3 (ABNT, 2010)
	Superfície específica – Blaine	NBR 16372 (ABNT, 2015)
	Distribuição granulométrica	Granulômetro a laser (Mastersizer 2000, da Malvern)
Caracterização química	Composição química (FRX)	NBR 14656 (ABNT, 2001) - Análise por meio de espectrômetro por fluorescência de raios x, modelo AxiosMax (Panalytical)
	pH	4500 – HB (APHA, 2005)
Caracterização Mineralógica	Difração de Raios-X	Difratômetro Bruker-AXS D4 Endeavour
Caracterização Microestrutural	MEV – Microscopia Eletrônica de Varredura	Microscópio Eletrônico de Varredura EVO MA10 - Zeiss
Caracterização Ambiental	Lixiviação	NBR 10005 (ABNT, 2004)
	Solubilização	NBR 10006 (ABNT, 2004)

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

3.4.1.1 Caracterização física

Para realização da caracterização física, foram realizados ensaios físicos no laboratório da UFES (LEMAC). Inicialmente foi realizado o ensaio de determinação da massa específica dos resíduos, de acordo com a NBR 16605 (ABNT, 2017). Além disso, também foi realizado o ensaio de massa unitária (Figura 20), descrito pela NBR 12127 (ABNT, 2017).

Figura 20 – Ensaio de massa unitária realizado nos resíduos siderúrgicos



Fonte: Acervo da autora (2021).

Como mencionado anteriormente, na etapa de beneficiamento foram realizados os ensaios de finura dos resíduos por meio das normas NBR 11579 (ABNT, 2012) e NBR 15894-3 (ABNT, 2010). A NBR 11579 (ABNT, 2012) apresenta o procedimento de determinação da finura na peneira de abertura 75 μm enquanto na NBR 15894-3 (ABNT, 2010) a finura é determinada por um processo de lavagem do material na peneira de abertura 45 μm e o auxílio de um dispersante. Também foi realizado o ensaio para determinação da superfície específica (Figura 21), através do método Blaine, de acordo com a NBR 16372 (ABNT, 2015).

A fim de avaliar o tamanho dos grãos, foi realizado o ensaio de granulometria a laser, utilizando o granulômetro Mastersizer 2000 – Malvern, do Laboratório Multiusuário de Caracterização Tecnológica do Centro de Tecnologia Mineral (CETEM), pois os resíduos analisados encontravam-se em granulometria fina após o procedimento de moagem.

Figura 21 – Ensaio de determinação da superfície específica Blaine



Fonte: Acervo da autora (2021).

3.4.1.2 Caracterização química

A caracterização química consistiu na determinação da composição química dos resíduos por meio de análise semiquantitativa de Fluorescência de Raios-X (FRX) e o ensaio foi feito por meio de um espectrômetro por fluorescência de raios-x, modelo AxiosMax (Panalytical), pelo Laboratório de Espectrometria por Fluorescência de Raios-X, do Centro de Tecnologia Mineral (CETEM). Além da composição química, o ensaio fornece a análise de perda ao fogo dos resíduos, que é a perda de massa que ocorre no material ao ser submetido a uma faixa de temperatura de até 1000°C e geralmente está relacionada com a quantidade de matéria orgânica residual presente no resíduo em análise.

Também foi realizado o ensaio de determinação do pH dos resíduos, com auxílio de um pHmetro de bancada (Figura 22) de acordo com o método proposto no Standard Methods 4500 – HB (APHA, 2005). Foi utilizado o pHmetro de bancada da marca KASVI, modelo K39-1014B, do Laboratório de Caracterização de Resíduos (LACAR) da UFES.

Figura 22 – pHmetro utilizado na identificação do pH dos resíduos



Fonte: Acervo da autora (2021).

3.4.1.3 Caracterização mineralógica

A caracterização mineralógica dos resíduos é importante para identificar a estrutura cristalina do material analisado, dando base para avaliação da sua reatividade química. Para isso, foi feita a análise de difração de raios-x para cada um dos resíduos, por meio de um difratômetro Bruker-AXS D4 Endeavour (Figura 23), do Laboratório Multiusuário de Caracterização Tecnológica do CETEM, a fim de constatar se o material é amorfo ou há a presença de fases cristalinas e, caso haja, identificar quais são essas fases.

Figura 23 – Difratômetro utilizado no ensaio de caracterização mineralógica dos resíduos



Fonte: Acervo da autora (2021).

3.4.1.4 Caracterização microestrutural

A caracterização microestrutural dos resíduos tem por objetivo conhecer a morfologia das partículas, fornecendo informações estruturais das amostras a partir de imagens tridimensionais. O modelo de equipamento utilizado foi EVO MA10, da fabricante Zeiss (Figura 24), do Laboratório de Microscopia Eletrônica e Microanálise do IFES, Campus Vitória.

Figura 24 – Equipamento utilizado no ensaio de microscopia eletrônica de varredura



Fonte: Acervo da autora (2021).

3.4.1.5 Caracterização ambiental

Como visto na revisão bibliográfica, os resíduos utilizados nesta pesquisa apresentam em sua composição química metais pesados como cromo e chumbo, além de apresentar grandes quantidades de zinco (MASLEHUDDIN et al., 2011), o que faz necessária uma caracterização ambiental, a fim de classificá-los segundo a NBR 10004 (ABNT, 2004).

Essa caracterização, portanto, foi realizada com o auxílio das normas NBR 10005 (ABNT, 2004) e NBR 10006 (ABNT, 2004), por meio dos ensaios de obtenção do extrato lixiviado e solubilizado dos resíduos. Desse modo foi possível classificá-los como perigosos, não perigosos, inertes ou não inertes.

3.4.2 Agregado Miúdo

O agregado miúdo utilizado foi areia natural de jazida. Após recebimento no LEMAC, o material foi submetido à secagem em temperatura ambiente e peneiramento manual para retirada de impurezas. Em seguida, a caracterização do material foi feita de acordo com os ensaios especificados na NBR 7211 (ABNT, 2019). A Tabela 4 apresenta os ensaios realizados no agregado miúdo e as normas pertinentes.

Tabela 4 - Ensaios de caracterização do agregado miúdo

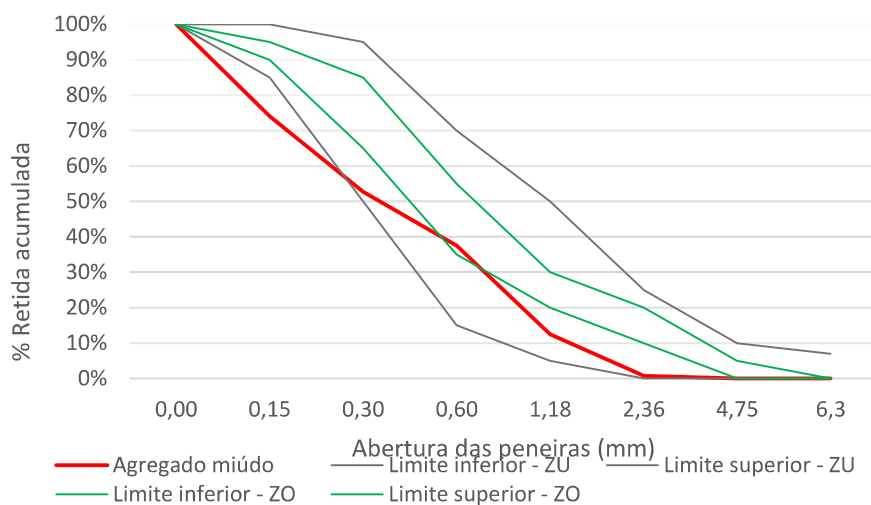
Propriedades	Normas	Resultados
Distribuição granulométrica	NBR NM 248 (ABNT, 2003)	Figura 25
Módulo de Finura	NBR NM 248 (ABNT, 2003)	1,77
Dimensão Máxima Característica (mm)	NBR NM 248 (ABNT, 2003)	2,36
Massa específica (g/cm³)	NBR NM 52 (ABNT, 2009)	2,64
Massa unitária (kg/m³)	NBR NM 45 (ABNT, 2006)	1785,26
Volume de vazios (%)	NBR NM 45 (ABNT, 2006)	32,3
Matéria Orgânica	NBR NM 49 (ABNT, 2001)	Mais escura
Material pulverulento (%)	NBR NM 46 (ABNT, 2003)	10,74
Teor de Argila e Materiais Friáveis (%)	NBR 7218 (ABNT, 2010)	0,55

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

É importante destacar que no ano de publicação deste trabalho já havia uma nova versão da norma NBR NM 52 (ABNT, 2009), referente ao ensaio de massa específica. A norma atual é a NBR 16916 (ABNT, 2021).

A curva de distribuição granulométrica do agregado miúdo utilizado na confecção dos concretos é mostrada na Figura 25.

Figura 25 – Curva de granulométrica do agregado miúdo



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

O teor de matéria orgânica do agregado miúdo foi determinado conforme a NBR NM 49 (ABNT, 2001). Neste ensaio, é produzida uma solução com o agregado miúdo que tem sua cor comparada com uma solução padrão, avaliando se é mais clara, mais escura ou igual a cor da solução padrão. Como mostrado na Figura 26, a solução produzida com o agregado miúdo apresentou cor mais escura que a solução padrão, indicando um teor elevado de matéria orgânica.

Figura 26 – Avaliação do teor de matéria orgânica do agregado miúdo



Fonte: Acervo da autora (2021).

Apesar do resultado encontrado, Neville (2015) explica que isso não necessariamente indica que o material não possa ser utilizado, pois a matéria orgânica presente pode

não ser prejudicial ao concreto. Estudos já realizados no LEMAC com o mesmo tipo de agregado miúdo, proveniente da mesma jazida, como os de Teixeira (2019), que produziu concretos com a adição de resíduo do sistema de dessulfuração de gases de indústrias siderúrgicas, mostraram bons resultados de resistência mecânica.

3.4.3 Agregado Graúdo

O agregado graúdo utilizado na pesquisa é proveniente da britagem de rochas graníticas, atendendo aos requisitos da NBR 7211 (ABNT, 2019), classificado na zona granulométrica 9,5/25. Antes de ser utilizado na produção dos concretos, o material foi lavado e seco em temperatura ambiente de modo a retirar todas as impurezas. Após a secagem o material foi ensaiado conforme as normas apresentadas na Tabela 5.

Tabela 5 - Ensaio de caracterização do agregado graúdo

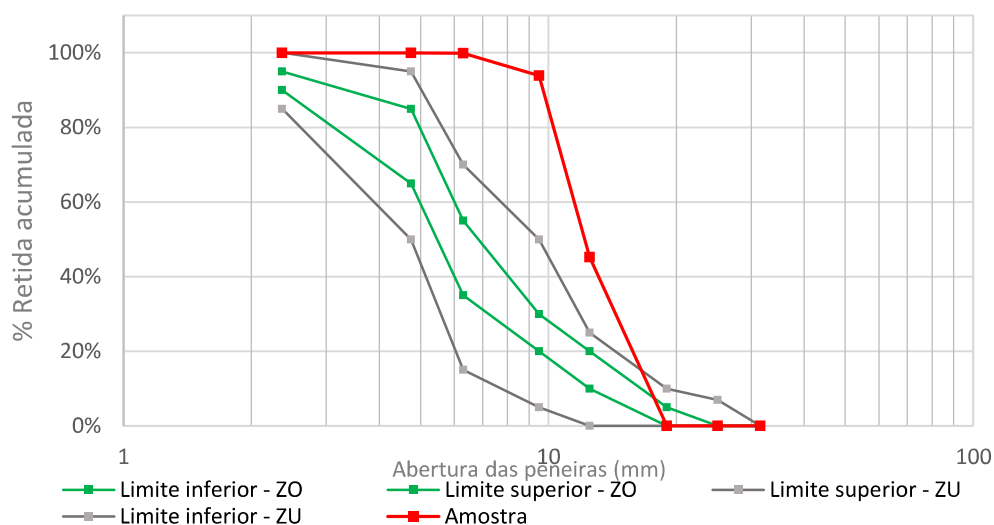
Fonte:	Propriedades	Normas	Resultados
	Distribuição granulométrica	NBR NM 248 (ABNT, 2003)	Figura 27
	Módulo de Finura	NBR NM 248 (ABNT, 2003)	2,94
	Dimensão Máxima Característica (mm)	NBR NM 248 (ABNT, 2003)	19
	Massa específica (g/cm³)	NBR NM 53 (ABNT, 2009)	2,78
	Massa unitária no estado solto (g/cm³)	NBR NM 45 (ABNT, 2006)	1605,31

Elaborado pela autora (2021).

No ano de publicação deste trabalho já havia uma nova versão da norma NBR NM 53 (ABNT, 2009), referente ao ensaio de massa específica. A norma atual é a NBR 16917 (ABNT, 2021).

A análise granulométrica foi feita conforme a NBR NM 248 (ABNT, 2003) e a curva granulométrica do agregado graúdo é mostrado na Figura 27.

Figura 27 – Curva granulométrica do agregado graúdo



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

3.4.4 Cimento

O cimento utilizado na pesquisa foi o Cimento Portland de Alta Resistência Inicial (CP V ARI), por ser o cimento com o menor teor de adições quando comparado aos outros existentes no mercado. De acordo com a NBR 16697 (ABNT, 2018) este cimento é constituído de 90 a 100% de clínquer e sulfatos de cálcio e de 0 a 10% de material carbonático e esta escolha foi feita com o objetivo de produzir uma matriz cimentícia mais pura, a fim de minimizar as interferências nos resultados dos ensaios por conta da interação entre as possíveis adições com os resíduos da pesquisa.

Assim que recebido no LEMAC, o cimento foi estocado em câmara seca sobre pallets e ensacado em sacos plásticos para evitar absorção de umidade. A caracterização do cimento foi obtida do fabricante. A Tabela 6 indica os ensaios de caracterização do cimento e os métodos de ensaio utilizados.

Tabela 6 - Caracterização do CP V - ARI

Propriedade		Método de ensaio	Limites NBR 16697 (2018)	Resultados
Massa específica (g/cm³)		NBR 16605 (ABNT, 2017)	N.E.	3,10
Finura	Superfície específica - Blaine (cm ² /g)	NBR 16372 (ABNT, 2015)	N.E.	4926
	Material retido na peneira 200 (%)	NBR 11579 (ABNT, 2012)	≤ 6,0	0,12
Tempo de pega	Início de pega (min)	NBR 16607 (ABNT, 2018)	≥ 60	135
	Fim de pega (min)		≤ 600	165
Resistência a compressão	1 dia (Mpa)	NBR 7215 (ABNT, 2019)	≥ 14,0	23,48
	3 dias (MPa)		≥ 24,0	33,93
	7 dias (Mpa)		≥ 34,0	39,56
	28 dias (MPa)		-	48,65
Composição química	Perda ao fogo - PF (%)	NBR NM 18 (ABNT, 2012)	≤ 6,5	3,77
	SiO ₂ (%)	NBR 14656 (ABNT, 2001)	-	15,1
	CaO (%)	NBR 14656 (ABNT, 2001)	-	57,6
	MgO (%)	NBR 14656 (ABNT, 2001)	≤ 6,5	2,29
	Al ₂ O ₃ (%)	NBR 14656 (ABNT, 2001)	-	4,35
	Fe ₂ O ₃ (%)	NBR 14656 (ABNT, 2001)	-	3,15
	K ₂ O (%)	NBR 14656 (ABNT, 2001)	-	0,36
	SO ₃ (%)	NBR 14656 (ABNT, 2001)	≤ 4,5	3,63
	Na ₂ O (%)	NBR 14656 (ABNT, 2001)	-	0,16
	Resíduo insolúvel - RI (%)	NBR NM 15 (ABNT, 2012)	≤ 3,5	1,06

Fonte: Fornecida por Cimentos Mizu (2021).

3.4.5 Água

A água utilizada foi fornecida pela rede de abastecimento da cidade de Vitória/ES (CESAN), em condições de potabilidade.

3.5 MÉTODOS

Nesta seção são descritos os métodos a utilizados para alcançar os objetivos da pesquisa, que englobam as etapas de dosagem dos concretos e moldagem dos corpos de prova e ensaios no concreto tanto no estado fresco quanto no estado endurecido. Todos os ensaios foram realizados no LEMAC – UFES.

3.5.1 Dosagem experimental dos concretos

O método utilizado para a dosagem e determinação dos traços dos concretos confeccionados nesta pesquisa é aquele proposto por Helene e Terzian (1992), conhecido como método IPT/EPUSP. A partir deste método é possível relacionar através de um diagrama de dosagem a resistência à compressão, relação água/cimento, traço e o consumo de cimento, de acordo com as leis de comportamento Abrams, Lyse e Molinari, de acordo com as Equações 1, 2 e 3, respectivamente.

$$f_{cj} = \frac{k_1}{k_2 \left(\frac{a}{c}\right)} \quad (1)$$

$$m = k_3 + k_4 \cdot a/c \quad (2)$$

$$C = \frac{1000}{k_5 + k_6 m} \quad (3)$$

Onde:

f_{cj} = resistência à compressão axial, à idade j, em Mpa;

a/c = relação água/cimento, em kg/kg;

m = relação agregados secos/cimento em massa, em kg/kg;

C = consumo de cimento por metro cúbico de concreto adensado, em kg/m³;

$k_1, k_2, k_3, k_4, k_5, k_6$ = constantes que dependem dos materiais (cimento, agregados, aditivos, entre outros).

3.5.1.1 Teor ideal de argamassa

Por meio do diagrama de dosagem são determinados os traços a serem utilizados na confecção dos concretos para posterior realização dos ensaios. Para a elaboração do diagrama de dosagem são necessários, no mínimo, três traços diferentes, que irão gerar três pontos distintos nos gráficos, sendo um rico em cimento (1:3,5), um intermediário (1:5,0) e um pobre em cimento (1:6,5). Recomenda-se iniciar com o traço

intermediário 1:5,0 em massa de cimento e agregados secos totais. Com auxílio das Equações 4 e 5 calcula-se a quantidade de material necessário.

$$\alpha = \frac{1 + a}{1 + m} \times 100 \quad (4)$$

$$C = \frac{\gamma}{1 + a + p + a/c} \quad (5)$$

α = Teor de argamassa (%);

$m = a + p$ = relação agregados secos/cimento em massa (kg/kg);

a = relação agregado miúdo seco/cimento em massa (kg/kg);

p = relação agregado graúdo seco/cimento em massa (kg/kg);

γ = massa específica do concreto (kg/m³).

Antes de moldar esse primeiro traço a betoneira é imprimada, ou seja, espalha-se uma mistura de argamassa na superfície interna do equipamento para que não ocorra perda de materiais do traço em questão. O excesso de material de imprimação é descartado.

A partir do traço intermediário, buscou-se um teor de argamassa (α) ideal por meio de um ajuste na proporção dos materiais, fixando um valor para o abatimento que é testado através da NBR 16889 (ABNT, 2020). Para isso, é estabelecido um teor de argamassa inicial (geralmente com base na experiência em laboratório), com uma quantidade fixa de agregado graúdo.

Neste trabalho, partiu-se de um teor de argamassa inicial de 48% para determinar o traço intermediário. Porém, com este teor não foi possível obter o abatimento desejado de 90 ± 10 mm. Desse modo, as quantidades de materiais (cimento, areia e água) foram sendo aumentadas até que se obtivesse o abatimento desejado, que ocorreu com um teor de argamassa de 52%, sendo este considerado o teor ideal, apresentando abatimento de 90 mm, como mostrado na Figura 28 (a e b).

Deve-se levar em consideração que o concreto produzido com o teor de argamassa ideal deve ter a capacidade de ser lançado e adensado adequadamente no elemento estrutural, analisando se há falta ou excesso de argamassa na mistura ou se há falta ou excesso de água.

Figura 28 – Ensaio de abatimento de tronco de cone



Fonte: Acervo da autora (2021).

Após a determinação do teor de argamassa ideal foram produzidos concretos a partir dos três traços – pobre (1:6,5), intermediário (1:5,0) e rico (1:3,5) – com base no teor definido de 52%, como mostra a Tabela 7.

Tabela 7 – Determinação do teor ideal de argamassa para o traço intermediário ($m = 5,0$)

m	Traço unitário (1 : a : p)			Brita (kg)	Cimento (kg)	Areia (kg)	Água (kg)	Relação a/agl	Abatimento (mm)	Consumo de cimento (kg/m ³)
	c	a	p							
3,5	1	1,34	2,16	25	11,57	15,51	4,95	0,43	90	484,19
5,0	1	2,12	2,88		8,68	18,40	4,3	0,50	90	366,24
6,5	1	2,9	3,6		6,94	20,14	4,27	0,62	90	291,08

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

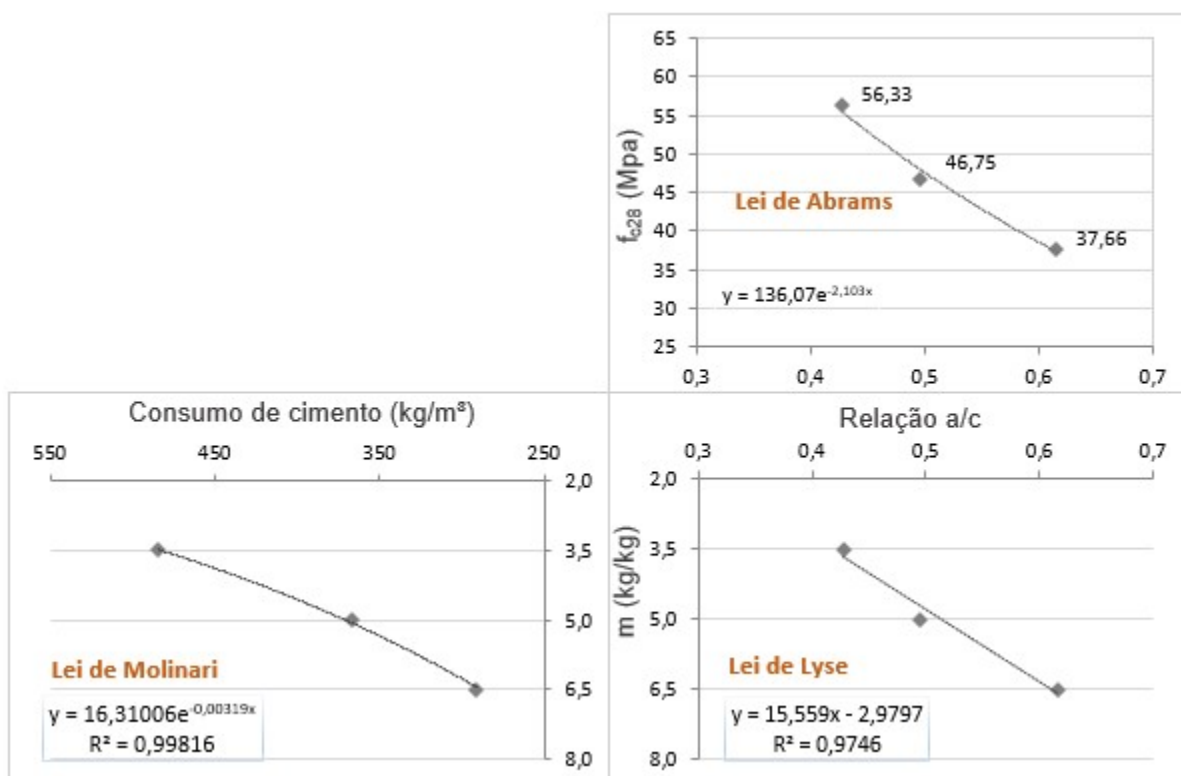
Foram então moldados 6 corpos de prova cilíndricos (10x20 cm) por traço, de acordo com a NBR 5738 (ABNT, 2015), a fim de se determinar a resistência à compressão axial aos 28 dias, conforme NBR 5739 (ABNT, 2018), que é utilizada como um dado de entrada para o diagrama de dosagem.

Com estes três traços é possível obter uma correlação entre as equações das leis de comportamento, possibilitando a confecção do diagrama de dosagem, como ilustrado na Figura 29.

É importante destacar que o diagrama de dosagem gerado serve apenas para o entendimento de uma mesma família de concreto, que utiliza o mesmo tipo de cimento, mesmos agregados e equipamentos, a fim de garantir o controle do processo sem que haja grandes variações (HELENE; TERZIAN, 1992).

A partir da montagem do diagrama é possível definir os traços unitários e as quantidades de material para cada mistura a ser feita na pesquisa.

Figura 29 - Diagrama de dosagem do concreto produzido com cimento CPV ARI



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

3.5.1.2 Definição dos traços de concreto

A partir da montagem do diagrama foi possível definir os traços unitários e as quantidades de materiais de cada mistura feita nesta pesquisa, para cada relação água/cimento prevista, como mostra a Tabela 8.

Tabela 8 – Traços unitários em massa dos concretos produzidos

Traço	Cimento	Areia	Brita	Resíduo	Relação a/agl	Consumo de cimento real (kg/m³)
REFERÊNCIA						
REF45	1	1,61	2,41	0,00	0,45	445
REF60	1	2,82	3,53	0,00	0,60	300
3% DE PÓ DE FEA						
PF03/45	1	1,61	2,41	0,03	0,45	437
PF03/60	1	2,82	3,53	0,03	0,60	294
10% DE PÓ DE FEA						
PF10/45	1	1,61	2,41	0,10	0,45	422
PF10/60	1	2,82	3,53	0,10	0,60	286
3% DE TERRA DE SHREDDER						
TS03/45	1	1,61	2,41	0,03	0,45	433
TS03/60	1	2,82	3,53	0,03	0,60	294
10% DE TERRA DE SHREDDER						
TS10/45	1	1,61	2,41	0,10	0,45	419
TS10/60	1	2,82	3,53	0,10	0,60	286

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

3.5.2 Propriedades dos concretos no estado fresco

As propriedades dos concretos no estado fresco foram avaliadas no próprio LEMAC – UFES, logo após as concretagens em todos os traços. A Figura 30 mostra a betoneira utilizada nas concretagens.

Figura 30 – Betoneira utilizada nas concretagens



Fonte: Acervo da autora (2021).

3.5.2.1 Consistência pelo abatimento do tronco de cone

Este ensaio foi realizado de acordo com a NBR 16889 (ABNT, 2020) com o objetivo de avaliar a trabalhabilidade adequada do concreto para moldagem dos corpos de prova através da determinação do abatimento do tronco de cone. Além disso, por meio deste ensaio foi possível avaliar a influência da adição dos resíduos siderúrgicos na consistência e trabalhabilidade dos concretos produzidos. A Figura 31 mostra o ensaio sendo realizado.

Figura 31 – Avaliação do índice de consistência através da determinação do abatimento do tronco de cone do concreto



Fonte: Acervo da autora (2021).

3.5.2.2 Massa específica e teor de ar

Mehta e Monteiro (2008) definem a massa específica como a massa de material por unidade de volume, incluindo os poros internos. Para obter a massa específica dos concretos produzidos com resíduos siderúrgicos nesta pesquisa, procedeu-se o ensaio de acordo com a NBR 9833 (ABNT, 2015), preenchendo com os concretos produzidos uma forma metálica cilíndrica de peso e volume conhecidos, conforme recomendação da NBR 5738 (ABNT, 2015). Após preenchidas, as formas foram pesadas e os pesos registrados. Com os dados registrados, a partir da Equação 6 foi obtida a massa específica dos concretos.

$$\rho_{ap} = \frac{m}{V} \times 1000 \quad (6)$$

Onde:

ρ_{ap} = massa específica aparente do concreto fresco;

m = massa de concreto;

V = volume do recipiente.

A partir do resultado da massa específica, também foi determinado o teor de ar nas misturas produzidas. Como não foi utilizado aditivo incorporador de ar nos concretos, o teor de ar obtido foi o incorporado à mistura durante o procedimento de homogeneização e adensamento. O teor de ar incorporado foi determinado por meio de equações presentes também na NBR 9833 (ABNT, 2009).

3.5.3 Propriedades dos concretos no estado endurecido

No estado endurecido foram avaliadas propriedades relacionadas com a durabilidade dos concretos produzidos com a incorporação dos resíduos siderúrgicos pó de FEA e Terra de Shredder, por meio de ensaios como absorção por capilaridade, potencial de corrosão e análise de altura de penetração de cloretos.

A moldagem dos corpos de prova cilíndricos e prismáticos se deu de acordo com a NBR 5738 (ABNT, 2015). Após 24 h de moldagem, os corpos de prova foram desformados, levados para câmara úmida e colocados em cura submersa em solução de água saturada em cal até atingirem as idades de ensaio, com exceção dos corpos de prova produzidos com adição de 10% de pó de FEA que levaram um tempo maior para endurecerem e foram levados para a cura após 48 h da moldagem.

3.5.3.1 Absorção por capilaridade

O ensaio de absorção por capilaridade foi realizado conforme a NBR 9779 (ABNT, 2012). Foram produzidos três corpos de prova cilíndricos 10x20 cm por traço que foram ensaiados na idade de 91 dias. Após 72 h de secagem em estufa a 100 °C os corpos de prova foram pesados para a determinação da massa seca (m_s). Em seguida, foram colocados sobre uma tela metálica em um recipiente contendo uma quantidade de água capaz de molhá-los a uma altura de 5 ± 1 mm, medida a partir das suas bases, como mostra a Figura 32(a). A partir do início do contato dos corpos de prova com a água, são realizadas pesagens para a determinação da massa saturada (m_{sat}) dos mesmos após 3h, 6h, 24h, 48h e 72h do início do ensaio. Após o fim do ensaio, os corpos de prova foram rompidos por compressão diametral, de forma a medir e avaliar a distribuição de água em seu interior, como mostra a Figura 32(b).

Figura 32 – Corpos de prova em contato com película de água a 5 ± 1 mm (a) e corpos de prova rompidos após o fim do ensaio (b)



Fonte: Acervo da autora (2021).

3.5.3.2 Potencial de corrosão

O ensaio de potencial de corrosão é um ensaio de durabilidade realizado em corpos de prova de concreto com a inserção de barras de aço, prescrito pela ASTM C 876 (ASTM, 2015), com o objetivo de avaliar o processo de corrosão induzido pela ação de íons cloreto em armaduras nos concretos, fornecendo a probabilidade de despassivação e de corrosão dessas armaduras.

Este ensaio avalia o potencial de corrosão de barras de aço inseridas no concreto, caracterizando-se por ser qualitativo e não destrutivo. Foram utilizados corpos de prova prismáticos (15 x 15 x 7 cm) com a inserção de 2 barras de aço CA 50 de \varnothing 6,3 mm, respeitando o cobrimento de 2 cm, que é o mínimo cobrimento nominal permitido pela NBR 6118 (ABNT, 2014).

Ao completar 28 dias de cura submersa, os corpos de prova prismáticos foram submetidos a ciclos alternados de imersão e secagem em solução agressiva de 5% de NaCl, simulando um ambiente marinho, conforme metodologia utilizada por Degen (2017) e Dietrich (2015), como mostra a Figura 33. A imersão em solução agressiva é feita por 2 dias, enquanto a secagem é feita por 5 dias em uma estufa ventilada.

Figura 33 – Ciclos de imersão e secagem dos corpos de prova do ensaio de corrosão



Fonte: Acervo da autora (2021).

É recomendado pela literatura que seja utilizada uma temperatura de até 50 °C na estufa, assim como realizado por Degen (2017) e Dietrich (2015), para que não haja alteração na microestrutura do concreto durante a realização do ensaio (MEIRA; FERREIRA, 2019). Nesta pesquisa foi adotada a temperatura de 60 ± 5 °C devido à restrição na disponibilidade de uso prolongado da estufa do laboratório em que foi realizado o ensaio, verificando, desse modo, a probabilidade de despassivação das armaduras com o andamento dos ciclos de imersão e secagem.

A partir de então, após cada etapa do ciclo foi verificada a diferença de potencial (ddp) entre a armadura no concreto e um eletrodo de referência através de um multímetro, como ilustrado no esquema da Figura 34.

Figura 34 - Esquema ilustrativo do ensaio de potencial de corrosão (a) e corpo de prova submetido ao ensaio (b)



Fonte: (a) Adaptado de ASTM C 876 (ASTM, 2015); (b) acervo da autora (2021).

Após o início do ensaio aos 28 dias de idade, os corpos de prova foram submetidos aos ciclos de imersão e secagem e ao fim de cada ciclo foram realizadas as medições do potencial de corrosão. Os ciclos de imersão e secagem e as medições são realizados até que todos os corpos de prova de um mesmo traço apresentem armaduras com potencial de corrosão na zona de probabilidade maior que 90% por duas aferições consecutivas, conforme eletrodo de referência utilizado, de acordo com a Tabela 9, adaptada de Ribeiro et al. (2012). Nesta pesquisa foi utilizado o eletrodo de cobre/sulfato de cobre (Cu/CuSO_4) como eletrodo de referência, por ser o disponível em laboratório.

Tabela 9 - Probabilidade de ocorrer despassivação da armadura de acordo com o tipo de eletrodo

ELETRODO	CORROSÃO ELETROQUÍMICA: PROBABILIDADE		
	< 10%	10% - 90% (incerta)	> 90%
NHE ^a	>0,118 V	(0,118V) – (0,032V)	< -0,032 V
Cu/CuSO ₄ , Cu ²⁺ (ASTM C 876)	>-0,200 V	(-0,200V) – (0,350V)	< -0,350 V
Hg, Hg ₂ Cl ₂ /KCl (saturado) ^b	>-0,124 V	(-0,124V) – (0,274V)	< -0,274 V
Ag, AgCl/KCl (1M)	> -0,104 V	(-0,124V) – (0,245V)	< -0,254 V

^a Normal Hydrogen Electrode (NHE)

^b Eletrodo de Calomelano Saturado (ECS)

Fonte: Adaptado de Ribeiro et al. (2012).

3.5.3.3 Espectroscopia por indução colorimétrica com aspersão de AgNO_3

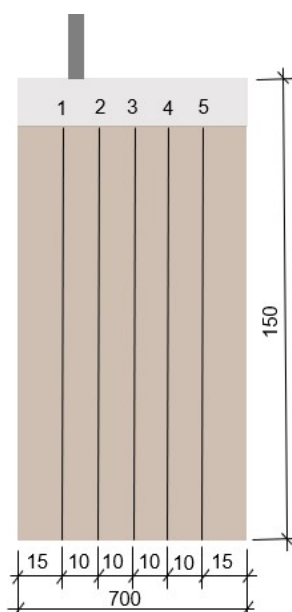
Após a indução da corrosão nas armaduras dos corpos de prova prismáticos do ensaio de potencial de corrosão e fim dos ciclos de imersão e secagem, foi realizado o ensaio de espectroscopia por indução colorimétrica nestes corpos de prova previamente ensaiados, com aspersão do indicador químico nitrato de prata (AgNO_3 – 0,1 mol/L) na superfície de concreto recém-fraturada, de modo a analisar qualitativamente a presença de cloretos livres no concreto ou frente de contaminação por cloretos, não quantificando teores.

O procedimento de ensaio segue a metodologia proposta pela norma italiana UNI 7928 (UNI, 1970) “*Determinazione della penetrabilità dello ione cloruro*”, atualmente em desuso. A partir deste ensaio, é possível determinar a profundidade de penetração da frente de cloretos livres, a partir de uma análise visual de mudança de cor na superfície do concreto com a aspersão do nitrato de prata.

A região em que é aspergida a solução de nitrato de prata, caso apresente concentração de íons cloreto superior a 0,15% de cloretos livres em relação à massa de cimento, adquire uma coloração esbranquiçada após um certo tempo devido à precipitação de AgCl. Já na região onde há a presença de cloretos combinados, não nocivos ao concreto, se forma o precipitado de Ag₂O, de coloração marrom (DIETRICH, 2015). Desse modo, é possível delimitar visualmente essas regiões, avaliando qualitativamente a frente de contaminação por cloretos no concreto analisado.

A avaliação da profundidade de penetração de cloretos foi feita por meio do software AutoCAD®, com a medição das alturas de penetração de cloretos livres (h), de modo a obter 5 medições ao longo do corpo de prova, desconsiderando-se pelo menos 10 mm de cada borda, sendo que cada leitura tenha a distância de 10 mm entre elas, como modelo ilustrado na Figura 35. Essa metodologia é adaptada da norma NT BUILD 492/99. Na análise dos resultados foram consideradas as médias das alturas de penetração 1, 2, 3, 4 e 5 de três corpos de prova de cada traço produzido.

Figura 35 – Modelo de medição das alturas de penetração de cloretos nos corpos de prova prismáticos



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

3.5.4 Avaliação da lixiviação de contaminantes

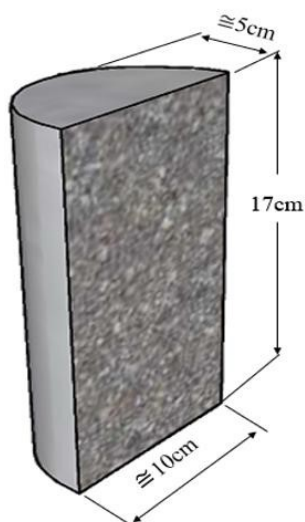
O concreto tem grande potencial para estabilização de compostos químicos (SOUZA et al., 2010), como por exemplo os metais pesados que, segundo a literatura, podem estar presentes nos resíduos pó de FEA e Terra de Shredder. Desse modo, é importante verificar se esses compostos químicos são encapsulados quando os resíduos são incorporados ao concreto. Essa análise pode ser feita por meio do ensaio de lixiviação de contaminantes.

Nesta pesquisa, a avaliação da lixiviação de contaminantes no concreto foi realizada de acordo com as normas EA NEN 7345 (NNI, 1995) e EA NEN 7375 (NNI, 2004). O ensaio tem por objetivo avaliar se os concretos produzidos são capazes de solidificar/estabilizar compostos químicos perigosos que podem estar contidos nos resíduos siderúrgicos, a partir da simulação da lixiviação de componentes inorgânicos de materiais monolíticos, durante um período de tempo de 64 dias.

Normas internacionais, como a holandesa EA NEN 7375 (NNI, 2004) e EA NEN7345 (NNI, 1995), têm sido bastante utilizadas em pesquisas recentes a fim de avaliar a lixiviação de contaminantes em materiais de construção, verificando se a matriz cimentícia encapsula ou não os metais pesados que podem compor os resíduos siderúrgicos (CUBUKCUOGLU; OUKI, 2019; VENÂNCIO; ROCHA; CHERIAF, 2013).

Para a realização do ensaio, foram utilizados corpos de prova cilíndricos, um por traço, que foram rompidos por tração por compressão diametral em prensa, dividindo o corpo de prova em duas partes iguais e, após isso, foram retificados a fim de ficarem com as dimensões como mostrado a Figura 36.

Figura 36 - Corpo de prova do ensaio de lixiviação



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

O ensaio consistiu em submergir as amostras de concreto separadamente em água ultrapura em um certo recipiente plástico de 2,5 L de capacidade volumétrica, que foi preenchido até um volume de 2,3 L, como mostra a Figura 37.

Figura 37 – Ensaio de lixiviação de contaminantes nas amostras de concreto



Fonte: Acervo da autora (2021).

O recipiente foi vedado e colocado em repouso por períodos de tempo determinados (6h, 24h, 54h, 4 dias, 9 dias, 16 dias, 36 dias e 64 dias), nos quais foram extraídas amostras da água filtrada em filtro de padrão analítico, sem cinzas, com auxílio de

uma bomba à vácuo para posterior análise química. Após cada etapa de coleta das amostras de água, a água do recipiente foi trocada.

As amostras coletadas foram colocadas em tubos do tipo Falcon de 50 mL e encaminhadas ao Laboratório de Espectrometria Atômica (LEA), o qual é parte do Laboratório de Pesquisa e Desenvolvimento de Metodologias para Análise de Petróleos da UFES (LABPETRO/UFES), para análise química através da técnica de Espectrometria de Massas com Plasma Indutivamente Acoplado (ICP-MS).

Os compostos químicos avaliados nas amostras foram: Arsênio, Cádmio, Chumbo, Cobalto, Cromo, Manganês, Mercúrio, Selênio e Zinco. Com os resultados da análise química, foi possível calcular a lixiviação de metais pesados nas amostras de concreto ensaiadas através da Equação 7, assim como realizado por Teixeira (2019).

$$Ei^* = \frac{Ci \times V}{f \times A} \quad (7)$$

Onde:

Ei^* = liberação do elemento por unidade de área no período i (mg/m^2);

Ci = a concentração do elemento no período i ($\mu g/L$);

V = o volume do lixiviante (L);

A = área superficial da amostra de concreto (m^2);

f = fator de conversão (1000 $\mu g/mg$).

A lixiviação acumulada para cada amostra é calculada pela Equação 8, de modo a classificar os materiais de acordo com a EA NEN 7345 (1995).

$$\varepsilon i^* = \sum_{i=1}^n Ei^* \quad \text{para } n = 1 \text{ a } N \quad (8)$$

Onde:

N = número de períodos de ensaio ($N=8$)

A norma classifica os materiais em três categorias, de acordo com os valores apresentados na Tabela 10.

Categoria 1: Quando ε_i^* é menor que U1 para cada metal pesado presente na amostra. Este material não apresenta nenhuma restrição ambiental relacionada ao seu uso;

Categoria 2: Quando ε_i^* está entre U1 e U2 para cada metal pesado presente na amostra. Estes materiais não apresentam nenhuma restrição ambiental ao seu uso, mas após sua vida útil é obrigatória a remoção dos elementos contaminantes com concentrações superiores a U1;

Categoria 3: Quando ε_i^* é maior que U2. Estes materiais tem uma utilização limitada.

Tabela 10 – Padrões cumulativos U1 e U2 da NEN 7345

Metais	U1 (mg/m²)	U2 (mg/m²)
Arsênio (As)	40	300
Cádmio (Cd)	1	7,5
Chumbo (Pb)	100	800
Cobalto (Co)	25	200
Cromo (Cr)	150	950
Manganês (Mn)	NC	NC
Mercúrio (Hg)	0,4	3
Selênio (Se)	1,5	9,5
Zinco (Zn)	200	1500

Fonte: NNI (1995).

3.6 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Os resultados dos ensaios realizados na pesquisa foram analisados estatisticamente por meio da análise de variância (ANOVA) com o auxílio do software de estatística Statistica 10.0.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este capítulo apresenta os resultados dos ensaios realizados conforme a metodologia apresentada no capítulo 4.

4.1 CARACTERIZAÇÃO DO RESÍDUO TERRA DE SHREDDER

Após a caracterização do resíduo Terra de Shredder de acordo com os ensaios descritos na seção 4, foram obtidos os resultados apresentados na Tabela 11.

Tabela 11 – Resultado da caracterização do resíduo Terra de Shredder

Propriedades Avaliadas		Resultado
Caracterização física	Massa específica	2,85 g/cm ³
	Massa unitária	790 kg/m ³
	Distribuição granulométrica	Figura 38
	Finura peneira 75 µm (#200)	NC*
	Finura peneira 45 µm (#325)	18,25%
	Superfície específica – Blaine	9405,79 cm ² /g
Caracterização química	Composição química (FRX)	Tabela 13
	pH	9,62
Caracterização Mineralógica	Difração de Raios-X	Figura 39
Caracterização Microestrutural	MEV – Microscopia Eletrônica de Varredura	Figura 40
Caracterização Ambiental	Lixiviação	Tabela 14
	Solubilização	

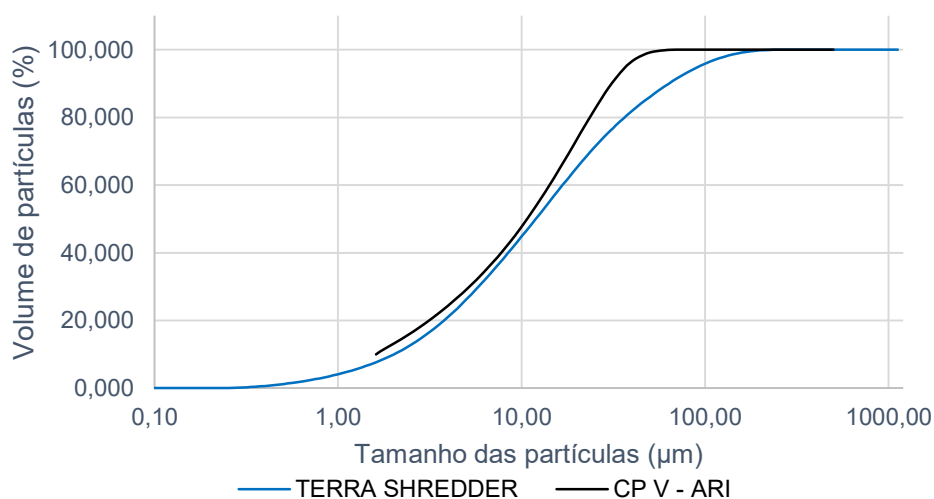
*NC: Ensaio não conclusivo

4.1.1 Caracterização física

A massa específica encontrada para o resíduo Terra de Shredder foi de 2,85 g/cm³, não muito inferior à do CP V ARI utilizado nesta pesquisa, que foi de 3,10 g/cm³. Caetano, Schalch e Pablos (2020), ao analisarem a fração fina de um resíduo do mesmo tipo como agregado miúdo encontraram uma massa específica de 2,71 g/cm³ para o material em seu estado natural.

A curva granulométrica da Terra de Shredder após as etapas de beneficiamento realizadas é apresentada na Figura 38, junto a granulometria do CP V ARI.

Figura 38 – Curva granulométrica do resíduo Terra de Shredder



Percebe-se que o material resultante do beneficiamento apresentou uma granulometria contínua, com 90% das partículas com até 71,29 µm, como mostra a Tabela 12. Quando comparado ao cimento, o resíduo apresentou-se um pouco mais fino, como observado na curva.

Tabela 12 – Diâmetros do resíduo Terra de Shredder e do CP V ARI

Parâmetros	Terra de Shredder	CP V ARI
d10 (µm)	2,26	1,61
d50 (µm)	13,42	10,76
d90 (µm)	71,29	31,17

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

O ensaio de finura na peneira de nº 200 (75 µm) foi realizado com o objetivo de comparar o resultado encontrado com o valor especificado pela NBR 16697 (ABNT, 2018) para o cimento Portland CP V ARI, utilizado nesta pesquisa. Porém, chegou-se à conclusão que o procedimento de peneiramento influenciou no resultado

do ensaio pois as partículas finas do material se aglomeravam durante a agitação da peneira, possivelmente devido à grande presença de óxido de ferro no material, e não passavam pela malha, não obtendo uma conclusão para este ensaio.

Assim, foi feito outro ensaio de finura, desta vez na peneira de nº 325 (45 µm), que é recomendado para materiais pozolânicos, como a argila calcinada, metacaulim e cinza volante – já conhecidamente utilizados na produção de concretos. O resultado obtido neste ensaio para a Terra de Shredder foi de 18,25%, estando em conformidade com os requisitos da norma e com esses materiais conhecidos.

A superfície específica (Blaine) encontrada para o resíduo foi de 9405,79 cm²/g, sendo superior à do CP V ARI, que é 4926 cm²/g. A superfície específica de adições minerais já conhecidamente utilizadas na produção de concretos, como a escória de alto-forno e cinza volante, varia em torno de 3500 a 5000 cm²/g (SILVA; BATTAGIN; GOMES, 2017). O uso desses materiais em matrizes cimentícias tem por objetivo melhorar o desempenho mecânico e reduzir a porosidade. Desse modo, comparando a superfície específica da Terra de Shredder com as referidas adições minerais, percebe-se um valor superior, indicando uma possível contribuição positiva da finura do material nos aspectos de durabilidade e nas propriedades mecânicas de concretos produzidos com a incorporação do resíduo.

4.1.2 Caracterização química

A Tabela 13 apresenta a composição química do resíduo Terra de Shredder estudado nesta pesquisa e na pesquisa de outros autores.

A composição química mostra uma predominância de sílica e ferro e isso ocorre principalmente pelo fato de o material ser formado por finos como terra e areia, além de metais não recuperados durante o processamento da sucata ferrosa, como o ferro. A presença de cloro pode ser proveniente dos plásticos das peças de veículos e eletrodomésticos que alimentam o triturador. Os metais pesados podem vir dos fluídos, baterias ou óleos lubrificantes que acabam não sendo retirados no processo de despoluição da sucata. Como a sucata que alimenta o triturador não é a mesma sempre, isso impacta em uma composição química bastante variável para o resíduo (MANCINI et al., 2014).

A perda ao fogo elevada pode estar associada ao elevado teor de matéria orgânica presente no material. Para a fração do resíduo abaixo de 2 mm, Figueiredo (2016) identificou um teor de voláteis de 8,48% a 550 °C, porém os resultados não foram constantes em outros estudos devido à variabilidade de composição do resíduo.

Tabela 13 – Composição química do resíduo Terra de Shredder

Parâmetro	Terra de Shredder desta pesquisa (CARRARETO, 2022)	Siviero et al. (2017)	Péra, Ambroise e Chabannet (2004)
SiO ₂	36	20,7	30,68
Fe ₂ O ₃	29,8	48,4	21,34
Al ₂ O ₃	6,3	7,9	4,57
CaO	4,9	7,2	9,34
Na ₂ O	2,9	0,6	2,85
MgO	1,8	3,5	3,53
TiO ₂	1,1	0,6	0,54
ZnO	0,83	1,8	2,21
K ₂ O	0,56	0,3	0,5
MnO	0,47	0,6	0,22
BaO	0,44	-	0,49
SO ₃	0,42	-	-
PbO	0,31	-	3,34
Cr ₂ O ₃	0,25	-	0,55
SrO	0,19	-	-
Cl	0,15	-	0,22
P ₂ O ₅	0,13	0,1	1,38
CuO	0,11	-	2,75
ZrO ₂	0,11	-	-
Perda ao fogo (1000 °C)	13,4	3,69	12,08

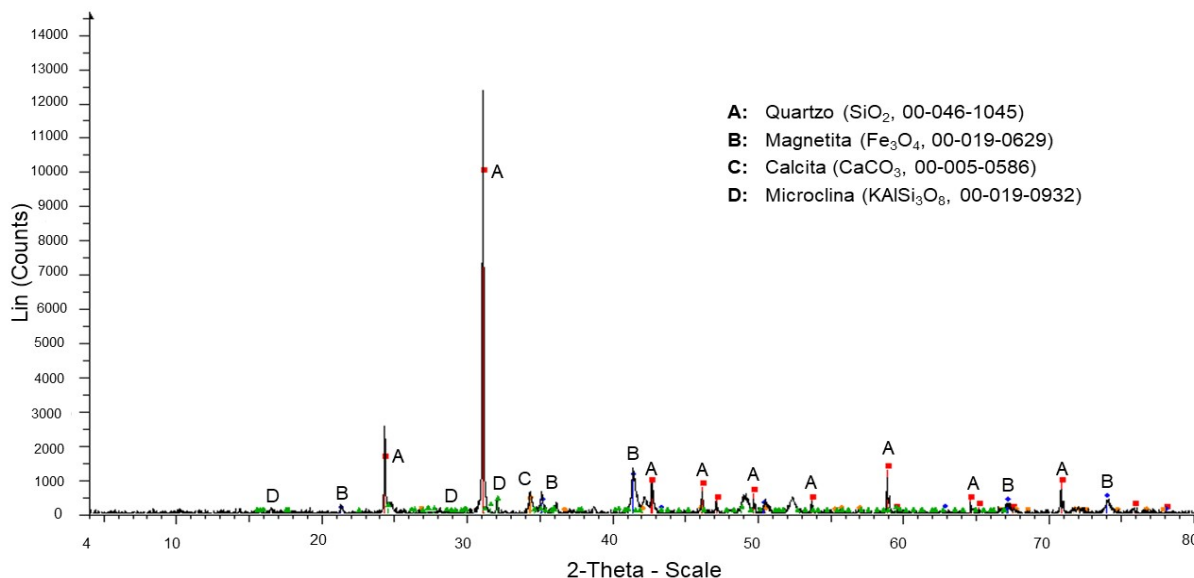
Fonte: Elaborado pela autora (2021).

O pH do resíduo, apesar de ser alcalino, encontra-se mais distante do pH médio de concretos, que se aproxima de valores entre 12,6 e 13,5 (NEVILLE, 2016). Portanto, ao incorporar este material como adição ao concreto, deve-se dar maior atenção aos possíveis efeitos dessa incorporação, principalmente em relação a concretos armados, no qual um pH baixo pode causar um desequilíbrio no pH da matriz e favorecer a despassivação das armaduras, facilitando o processo de corrosão. Nos estudos de Batista (2014), foi feita a análise do pH de treze amostras de Terra de Shredder, e o valor médio encontrado foi de 8,56.

4.1.3 Caracterização mineralógica

O difratograma de raios-X (Figura 39) apresenta as principais fases minerais da Terra de Shredder.

Figura 39 – Difratograma de raios-X do resíduo Terra de Shredder



Fonte: Acervo da autora (2021).

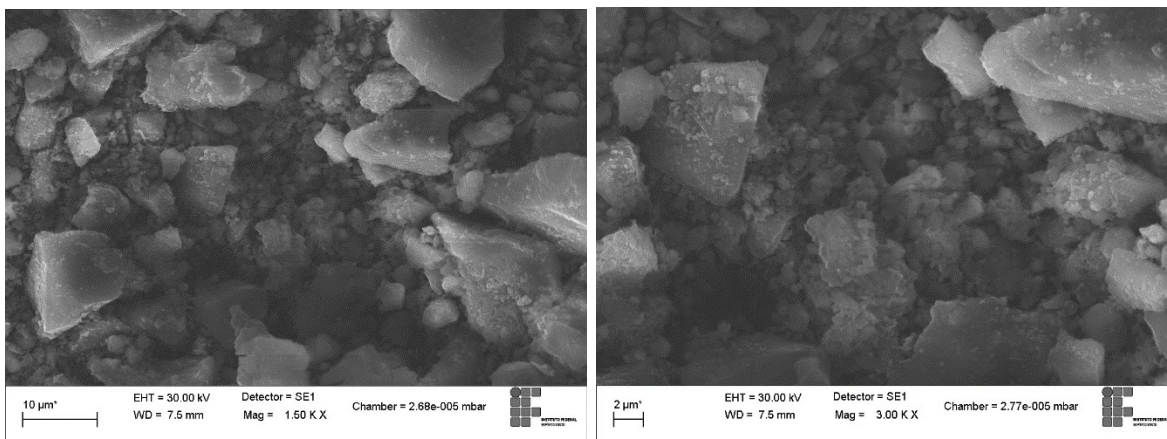
No difratograma do resíduo Terra de Shredder é possível identificar predominância de cristais de quartzo. Em seguida, em menores intensidades, cristais de magnetita, calcita e microclina. Percebe-se que o difratograma corrobora os resultados de composição química do resíduo, pois há a predominância de sílica e ferro nos cristais que aparecem com maior intensidade, assim como encontrado no ensaio de FRX.

A presença de quartzo em maior intensidade deve-se principalmente ao fato de o resíduo conter terra e areia (MANCINI et al., 2014) e, por ser de grande heterogeneidade com grande diversidade de materiais em sua composição, podem existir picos variados de cristais.

4.1.4 Caracterização microestrutural

A morfologia do resíduo Terra de Shredder é apresentada na Figura 40.

Figura 40 - Microestrutura do resíduo Terra de Shredder desta pesquisa



Fonte: Acervo da autora (2021).

Como já mencionado anteriormente e constatado também nas caracterizações química e mineralógica, a Terra de Shredder é um material heterogêneo. Desse modo, a morfologia de suas partículas também se apresenta heterogênea, com algumas variações de tamanho, assim como encontrado em outro estudo que analisou diferentes frações do resíduo obtido do triturador Shredder (CÂMARA, 2017). O procedimento de moagem utilizado também pode ter influenciado na morfologia das partículas.

4.1.5 Caracterização ambiental

Os resultados encontrados por meio da análise de lixiviação e solubilização do resíduo Terra de Shredder foram comparados com os limites estabelecidos na NBR 10004 (ABNT, 2004c), apresentados na Tabela 14.

Pelo fato de não ter apresentado nenhum elemento acima do limite de norma na análise do extrato lixiviado, a Terra de Shredder se caracteriza como um resíduo não-perigoso de acordo com a NBR 10004 (ABNT, 2004).

Tabela 14 – Resultado da análise dos extratos lixiviado e solubilizado do resíduo Terra de Shredder

Elementos	Extrato Lixiviado		Extrato Solubilizado	
	Terra de Shredder (µg/L)	Limite da NBR 10004 (µg/L)	Terra de Shredder (µg/L)	Limite da NBR 10004 (µg/L)
Bário	2377,42	70000,00	125,895	700,00
Zinco	163874,44	-	68,095	5000,00
Selênio	24,21	1000,00	9,215	10,00
Manganês	28636,53	-	314,685	100,00
Cromo	94,43	5000,00	18,945	50,00
Chumbo	50,75	1000,00	11,135	10,00
Cobre	17,44	-	35,715	2000,00
Cádmio	90,81	500,00	1,025	5,00
Arsênio	5,42	1000,00	21,665	10,00

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Entretanto, apresentou solubilidade em água maior do que o limite estabelecido em relação ao manganês, chumbo e arsênio, o que significa que pode apresentar combustibilidade, biodegradabilidade e solubilidade em água, classificando-o como resíduo não-perigoso e não-inerte, Classe II A. Batista (2014), ao analisar um resíduo da Shredder com características semelhantes ao desta pesquisa, através do ensaio de lixiviação e solubilização do material, encontrou a mesma classificação de acordo com a norma, porém com mais elementos excedentes, o que se justifica pelo fato do resíduo ser bastante heterogêneo e variar conforme a planta.

Embora os resíduos classificados como Classe II A não apresentem os mesmos riscos ao meio ambiente como aqueles com classificação I, é importante verificar maneiras de disposição adequada, pois ainda podem apresentar características químicas reativas a determinados meios.

4.2 CARACTERIZAÇÃO DO RESÍDUO PÓ DE FEA

Após a caracterização do resíduo pó de FEA de acordo com os ensaios descritos na seção 4, foram obtidos os resultados apresentados na Tabela 15.

Tabela 15 – Resultado da caracterização do resíduo pó de FEA

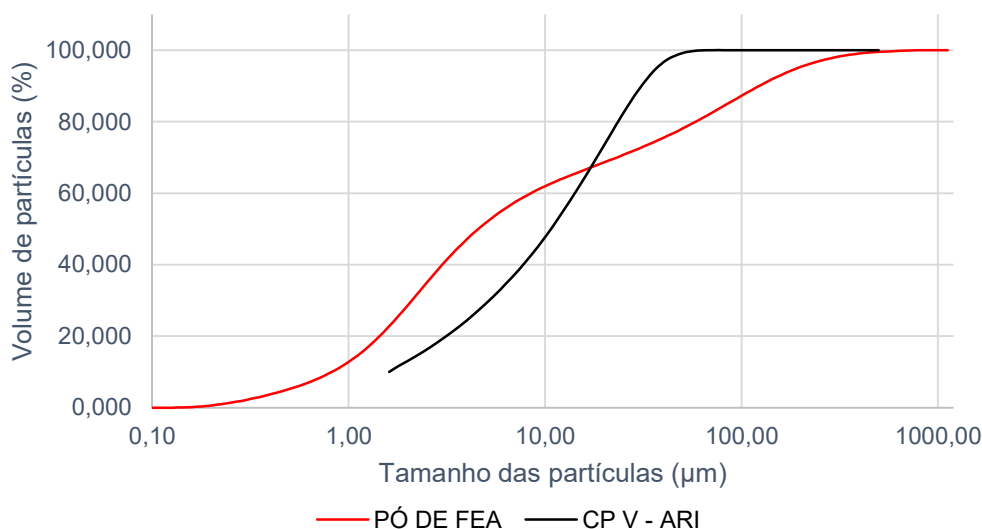
Propriedades Avaliadas	Resultado	
Caracterização física	Massa específica	4,66 g/cm ³
	Massa unitária	750 kg/m ³
	Distribuição granulométrica	Figura 41
	Finura peneira 75 µm (#200)	NC*
	Finura peneira 45 µm (#325)	20%
	Superfície específica – Blaine	11656,15 cm ² /g
Caracterização química	Composição química (FRX)	Tabela 17
	pH	11,74
Caracterização Mineralógica	Difração de Raios-X	Figura 42
Caracterização Microestrutural	MEV – Microscopia Eletrônica de Varredura	Figura 43
Caracterização Ambiental	Lixiviação	Tabela 18
	Solubilização	

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

4.2.1 Caracterização física

A massa específica encontrada para o pó de FEA foi 4,66 g/cm³, de acordo com o esperado quando comparado com a literatura, na qual foram encontrados valores em torno de 4,08 e 4,44 g/cm³ (SOUZA et al., 2010; METZ, 2016; SILVA, 2018; BREHM, 2004). Já quando comparada à massa específica do cimento utilizado na pesquisa (3,10 g/cm³) o valor encontrado foi superior. Este resultado encontrado para massa específica é atribuído à composição química e mineralógica do resíduo, que demonstra a presença de grandes quantidades de zinco e ferro (SOUZA et al., 2010). Na Figura 41 é possível ver o resultado da análise granulométrica do resíduo junto à do cimento.

Figura 41 – Curva granulométrica do resíduo Pó de FEA e CP V ARI



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Analisando a curva do resíduo pó de FEA percebe-se uma granulometria contínua, com a presença de uma variedade de tamanhos de grãos. Magalhães et al. (2019) afirmam que existem duas frações principais para o resíduo: uma muito fina, de aproximadamente 3,8 µm, e uma outra fração fina, com partículas de diâmetro aproximado de 26 µm e, apesar da predominância destas duas frações, existe também a presença de partículas maiores, com diâmetros que podem alcançar 478 µm. No item 5.2.4, que trata da caracterização microestrutural do resíduo, é possível observar na morfologia dos grãos do pó de FEA que de fato existe uma variação no tamanho das partículas que compõem o material, assim como mostrado na curva granulométrica.

Os parâmetros d10, d50 e d90 do resíduo analisado foram de, respectivamente, 0,92 µm, 5,14 µm e 138,50 µm. Já Magalhães et al. (2017) e Metz (2016) encontraram valores de d10, d50 e d90 de 2,57 µm, 10 µm, 67,58 µm e 0,22 µm, 0,51 µm, 1,76 µm, respectivamente. É possível perceber que há uma variação entre os parâmetros nos diferentes estudos. O tamanho das partículas e a suas formas estão associadas ao mecanismo de formação do material no interior do forno elétrico a arco (METZ, 2016) o que resulta nesta variação granulométrica entre resíduos de diferentes plantas.

Assim como ocorrido no ensaio realizado para a Terra de Shredder, ao realizar o ensaio de finura na peneira de nº 200 (75 µm) também foi constatado que o

procedimento de peneiramento influenciou no resultado do ensaio para o pó de FEA, pois com a técnica de agitação da peneira se formava uma aglomeração das partículas finas e estas não passavam pela malha, obtendo assim um resultado não conclusivo. Desse modo, também foi realizado o ensaio na peneira de nº 325 (45 µm), recomendado para materiais pozolânicos, e o resultado obtido foi de 20%, estando dentro do limite de norma.

A superfície específica do pó de FEA, que compreende a área de superfície total das partículas do resíduo e seus poros, foi de 11572,29 cm²/g. Este ensaio fornece uma medida indireta da finura dos resíduos e está fortemente relacionado com a capacidade de empacotamento das partículas. Como mostrado na Tabela 6 de caracterização do cimento, o CP V ARI utilizado na pesquisa possui superfície específica de 4926 cm²/g, bem menor quando comparado ao resíduo.

Souza et al. (2010) e Magalhães et al. (2019) encontraram valores de 7310 cm²/g e 8800 cm²/g para o resíduo, respectivamente. Uma das possíveis causas para este distanciamento encontrado nos resultados apresentados é o fato de que esse método não é indicado para partículas muito finas. Alguns autores defendem que esta técnica não apresenta resultados com grande precisão para avaliação de partículas abaixo de 10 µm e também ressaltam a importância da correta e constante calibração do equipamento (HUNGER; BROUWERS, 2009). Assim, a aplicação desse ensaio é como apoio à interpretação dos demais.

Materiais já utilizados como adição mineral nos cimentos, como a escória de alto-forno e a cinza volante, possuem superfície específica Blaine em torno de 3500 e 5000 cm²/g e, comumente são utilizados com o objetivo de melhorar as propriedades das matrizes cimentícias (SILVA; BATTAGIN; GOMES, 2017). Assim, a elevada superfície específica do resíduo pó de FEA pode tanto influenciar nas propriedades das matrizes de cimento com ele produzidas, melhorando as propriedades mecânicas e de durabilidade como também pode impactar na demanda por água dos concretos e afetar a trabalhabilidade das misturas.

4.2.2 Caracterização química

A Tabela 16 apresenta a composição química do pó de FEA estudado nesta pesquisa e na pesquisa de outros autores.

Tabela 16 – Composição química do resíduo pó de FEA

Parâmetro	Pó de FEA desta pesquisa (CARRARETO, 2022)	Magalhães et al. (2017)	Fares et al. (2016)	Lozano-Lunar et al. (2019)	Maslehuddin et al. (2011)
Fe ₂ O ₃	42,5	35,92	41,3	29,9 - 31,8	2,3
ZnO	19	31,34	10,01	34,2 - 38,3	0,7
Na ₂ O	8,4	-	5,8	2,7 - 3,2	1,7
CaO	4,3	13,32	14,1	3,0 - 4,8	9,39
Cl	4	2,06	-	5,0 - 11,9	-
MgO	3,1	2,52	6,2	1,6 - 1,7	-
SiO ₂	2,8	3,89	3,96	2,8 - 3,3	0,06
MnO	2,1	3,92	0,95	2,6 - 3,1	1,8
K ₂ O	1,6	-	-	2,0 - 2,2	<0,01
PbO	1,2	1,72	-	2,3 - 2,9	0,13
SO ₃	1	1,07	0,92	2,3 - 2,6	1,31
Al ₂ O ₃	0,38	-	1,21	1	0,57
P ₂ O ₅	0,31	-	-	0,2 - 0,3	0,01
Cr ₂ O ₃	0,26	0,82	-	0,5 - 0,6	0,09
CuO	0,2	0,26	-	-	-
Br	0,11	-	-	-	-
TiO ₂	<0,1	-	-	-	33,6
CdO	-	0,09	-	-	10,7
NiO	-	0,44	-	-	2,6
Perda ao fogo (1000 °C)	8,6				2,38

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

É possível perceber que o resíduo analisado está de acordo com a literatura encontrada, com diferenças maiores apenas nas quantidades de zinco e ferro. Isso se explica pelo fato de que a composição química do resíduo pode variar dentro de uma mesma planta industrial e em diferentes plantas devido a fatores como o tipo de sucata utilizado para alimentar o forno elétrico, as condições de funcionamento do forno, os procedimentos adotados na produção do aço, dentre outros. A grande quantidade de zinco e ferro deve-se ao fato de o 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 no resíduo (SIMONYAN; ALPATOVA; DEMIDOVA, 2019).

A grande quantidade de zinco presente no resíduo é fundamental para esclarecer o comportamento de matrizes cimentícias com a incorporação de pó de FEA, pois este influencia no tempo de endurecimento da pasta de cimento, indicando o uso do material como um retardador de pega (MAGALHÃES et al., 2019).

A quantidade elevada de CaO presente em alguns dos resíduos deve-se aos fundentes que são adicionados no processo de siderurgia, a depender do processo

produtivo (MACHADO et al., 2006). Já a presença de cloro pode estar associada ao material utilizado na pintura das sucatas que alimentam o forno elétrico a arco (TELLES, 2010) e pode variar de planta a planta. Ao estudar a utilização deste tipo de resíduo em concreto armado, é importante avaliar a influência do teor de cloretos no processo de corrosão de armaduras, de modo a verificar a sua viabilidade de uso sem que prejudique a durabilidade das estruturas.

Deve-se dar atenção também ao teor de óxido de magnésio presente no resíduo, pois a norma brasileira de cimento – NBR 16697 (ABNT, 2019) – limita em 6,5% o teor de MgO em cimentos, de modo a não causar reações expansivas.

A presença de metais pesados como chumbo e cromo torna limitada a aplicação do resíduo em matrizes cimentícias e até mesmo seu descarte em aterros. Desse modo, ao analisar a aplicação desse tipo de material em argamassas e concretos, há a necessidade de estudar a lixiviação de contaminantes nos compósitos produzidos ou a estabilização desses compostos, visando a segurança ambiental.

Percebe-se também um teor de álcalis elevado, principalmente o Na_2O , o que não é desejável para concretos, pois pode favorecer a ocorrência de reação álcali-agregado, gerando reações expansivas e fissurações (SILVA; BATTAGIN; GOMES, 2017). Desse modo, caso seja feito o uso do resíduo na produção de concretos, é necessário um controle dos agregados utilizados para que esse problema seja evitado.

Nota-se também que o resíduo não apresenta grandes quantidades de óxido de cálcio, sílica, alumina e óxido de ferro, compostos essenciais ao cimento. Assim, não pode ser considerado uma adição pozolânica, pois não atende um dos requisitos da NBR 12653 (ABNT, 2015), que exige que as somas dos compostos $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ para pozolanas de classe E seja maior ou igual a 50%.

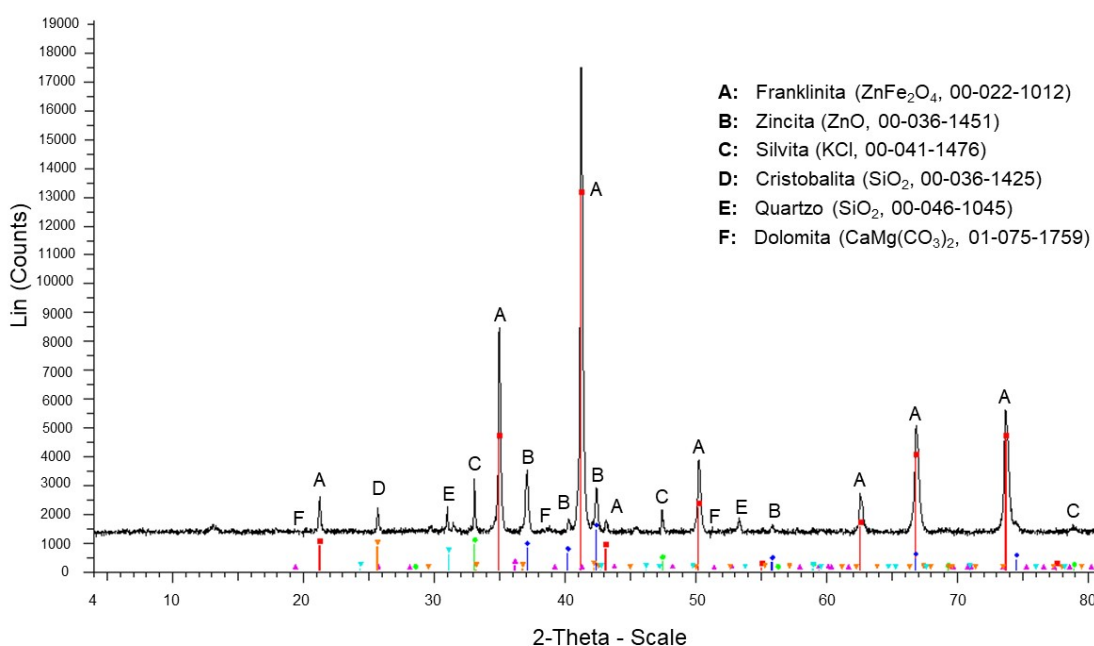
A perda ao fogo encontrada para o pó de FEA foi de 8,6%, próximo ao valor de 8,17% encontrado por Silva (2018), enquanto Fares et al. (2016) encontraram 5,68%. Essa perda de massa do pó de FEA pode estar relacionada à volatilização de elementos químicos presentes no resíduo, como Zn, Pb, Cd e Cl e, em menor proporção, à combustão de matéria orgânica (SILVA, 2018). Além disso, como há uma grande variação na composição do resíduo planta a planta, a perda ao fogo também pode variar bastante.

O pH encontrado para o resíduo foi 11,74, próximo ao valor médio de pH encontrado para concretos, que se situa na faixa de 12,5 e 13,5 (NEVILLE, 2016). A verificação dessa característica química do pó de FEA é importante pois a presença de metais pesados em sua composição, como o zinco, pode atrapalhar o processo de hidratação das matrizes cimentícias com sua incorporação; desse modo, um ambiente alcalino proporciona a retomada deste processo na matriz cimentícia. Ao favorecer a hidratação, isso reflete em outras propriedades na matriz, como por exemplo a resistência mecânica (LOZANO LUNAR et al., 2019).

4.2.3 Caracterização mineralógica

A caracterização mineralógica é apresentada no difratograma (Figura 42), indicando as principais fases minerais do pó de FEA.

Figura 42 – Difratograma de raios-X do resíduo pó de FEA



Fonte: Acervo da autora (2021).

Os picos de maior relevância encontrados no resíduo são os cristais de Franklinita (ZnFe_2O_4) e, em seguida, porém em intensidades menores, também é possível notar

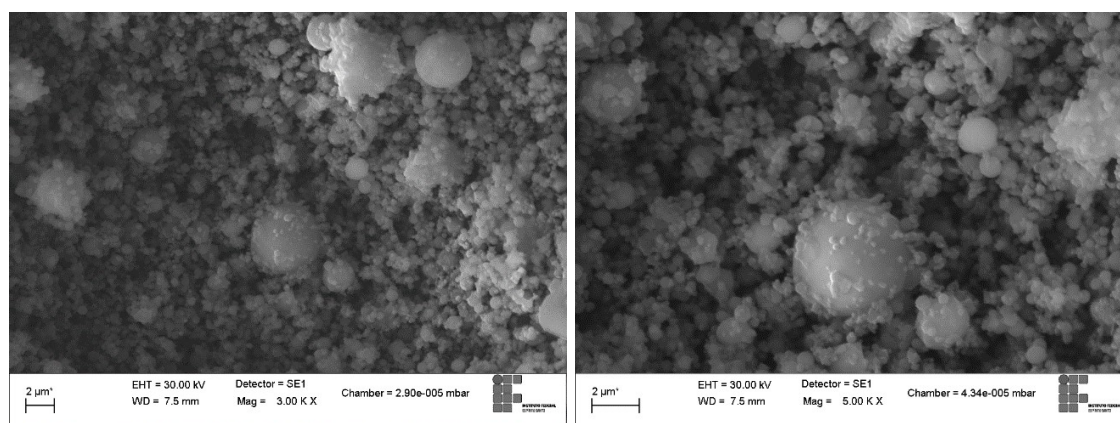
a presença de Zincita (ZnO), Silvita (KCl), Cristobalita (SiO₂), Quartzo (SiO₂) e Dolomita (CaMg(CO₃)₂).

Telles (2010) destaca que os percentuais de Zincita e Franklinita no resíduo estão associados a maior ou menor presença de zinco, pois quanto menor o teor de zinco, maior é a concentração de Franklinita, o que é corroborado pelo ensaio de composição química; assim como quanto maior o teor de zinco, maior o teor de Zincita.

4.2.4 Caracterização microestrutural

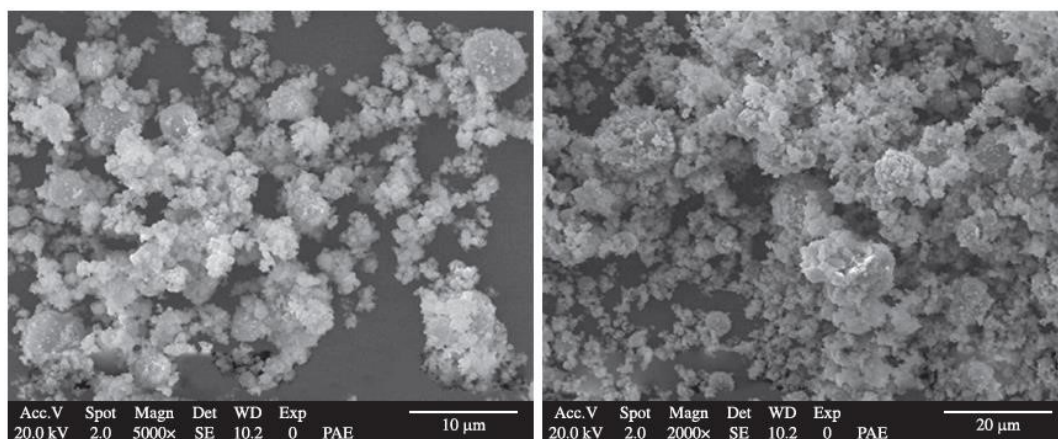
A caracterização microestrutural do pó de FEA (Figura 43) mostrou que a morfologia das partículas do resíduo segue o mesmo padrão do que é encontrado na literatura. As partículas do pó de FEA assumem um formato esférico, apresentando-se em aglomerados de partículas que cobrem as partículas maiores, assim como nos resíduos do mesmo tipo estudados por Souza et al. (2010) e Machado et al. (2006), mostrados na Figura 44 e Figura 45, respectivamente.

Figura 43 – Microestrutura do resíduo pó de FEA desta pesquisa



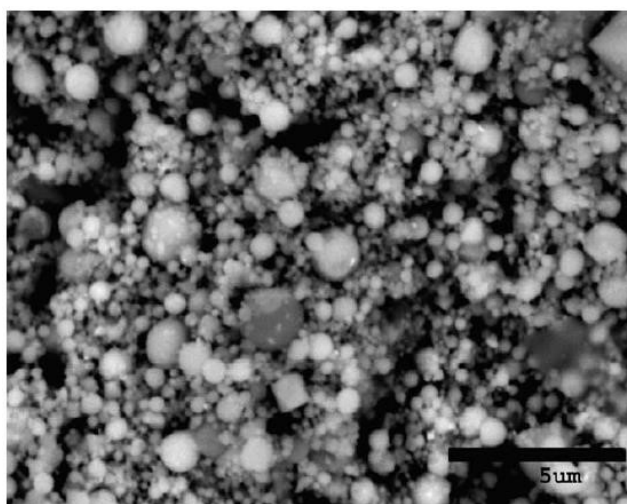
Fonte: Acervo da autora (2021).

Figura 44 – Microestrutura do resíduo pó de FEA do estudo de Souza et al. (2010)



Fonte: Souza et al. (2010).

Figura 45 – Microestrutura do resíduo pó de FEA do estudo de Machado et al. (2006)



Fonte: Machado et al. (2006).

A forma esférica e de aglomerado de partículas em que se apresenta o resíduo analisado em microscópio eletrônico está relacionada ao mecanismo de formação das poeiras no forno elétrico à arco, devido ao 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 morfologia esférica das partículas e sua superfície lisa podem contribuir para um aumento da trabalhabilidade de misturas de concreto produzidas com esse resíduo, pois proporcionam um efeito lubrificante, de rolamento (MANTOVANI; KULAKOWSKI; MORAES, 2014).

4.2.5 Caracterização ambiental

Os resultados encontrados por meio da análise de lixiviação e solubilização do resíduo pó de FEA foram comparados com os limites estabelecidos na NBR 10004 (ABNT, 2004c), apresentados na Tabela 17.

A partir dos ensaios, constatou-se que o pó de FEA é classificado como Classe I - Perigoso pois as concentrações de metais pesados como cádmio e chumbo estão acima dos limites estabelecidos no anexo F da NBR 10004 (ABNT, 2004c), assim como o selênio.

Tabela 17 – Resultado da análise dos extratos lixiviado e solubilizado do resíduo pó de FEA

Elementos	Extrato Lixiviado		Extrato Solubilizado	
	Pó de FEA (µg/L)	Limite da NBR 10004 (µg/L)	Pó de FEA (µg/L)	Limite da NBR 10004 (µg/L)
Bário	1639,95	70000,00	406,155	700,00
Zinco	2667130,60	-	416,005	5000,00
Selênio	1010,52	1000,00	2377,65	10,00
Manganês	9233,68	-	28,82	100,00
Cromo	1830,1	5000,00	474,84	50,00
Chumbo	26854,96	1000,00	2658,315	10,00
Cobre	3125,44	-	361,745	2000,00
Cádmio	6788,69	500,00	2,465	5,00
Arsênio	308,68	1000,00	92,805	10,00

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Vargas, Masuero e Vilela (2006) também identificaram cádmio e chumbo acima dos limites em um resíduo do mesmo tipo, classificando-o como perigoso. Um resíduo classificado como perigoso apresenta uma maior dificuldade de reaproveitamento, devido à complexidade gerada pela presença dos metais pesados, levando a um descarte em aterros próprios para resíduos perigosos.

Neste caso, é válido aplicar a técnica de solidificação/estabilização dos metais pesados – método não destrutivo de imobilizar os constituintes perigosos de um resíduo tornando-o menos lixiviável. Esse método pode ser feito por meio da produção

de um sólido monolítico gerado a partir de uma matriz de cimento Portland com adição do resíduo perigoso que, mediante um processo complexo, encapsula e estabiliza os metais pesados, tornando-os menos solúveis em água (SILVA, 2007).

Entretanto, o Brasil possui apenas a norma de lixiviação (NBR 10004) referente aos materiais em forma granular, como apresentado neste tópico, e não como um material monolítico, como os desenvolvidos na construção civil. Assim, é necessária a aplicação de outras técnicas, como a apresentada nas normas holandesas EA NEN 7375 (NNI, 2004) e EA NEN 7345 (NNI, 1995), a fim de verificar a capacidade dos blocos em encapsular os metais pesados presentes nos resíduos, garantindo a integridade da estrutura e a saúde dos usuários. Desse modo, no tópico 5.5, será analisada a lixiviação de contaminantes em concretos produzidos com a adição do resíduo pó de FEA a fim de verificar se o concreto promove o encapsulamento dos metais pesados presente no material estudado.

Estudos realizados por Souza et al. (2010) mostraram que o uso do resíduo pó de FEA em concretos pode ser vantajoso do ponto de vista das propriedades mecânicas e de durabilidade e também comprovam a capacidade do concreto em estabilizar elementos potencialmente tóxicos presentes no resíduo.

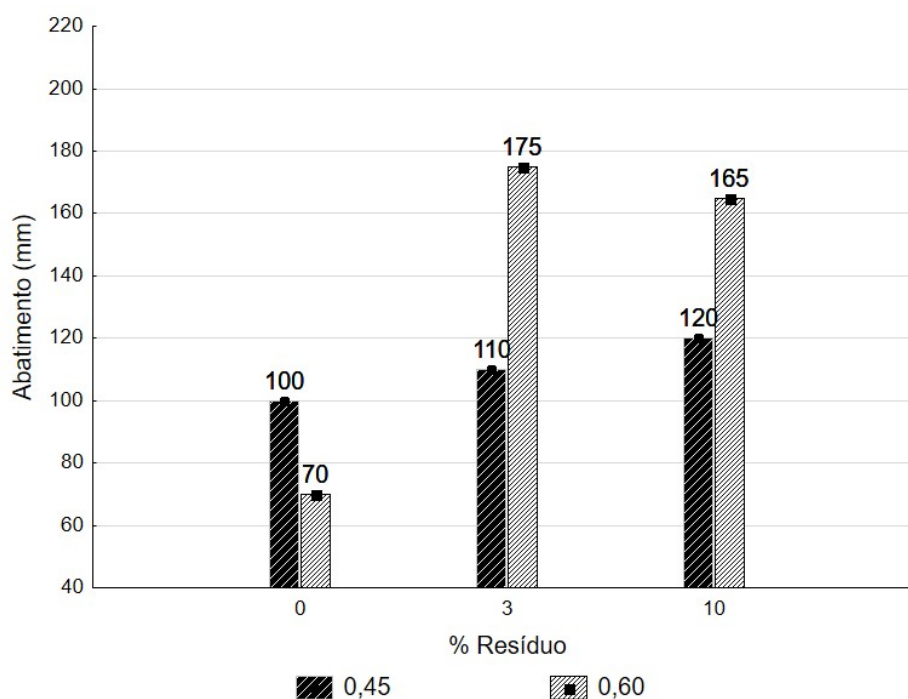
4.3 ENSAIOS NO ESTADO FRESCO

A seguir são apresentados os resultados de consistência pelo abatimento do tronco de cone realizado nos concretos com adição de Terra de Shredder e pó de FEA de acordo com a NBR 16889 (ABNT, 2020).

4.3.1.1 Consistência pelo abatimento do tronco de cone dos concretos produzidos com adição de Terra de Shredder

A Figura 46 apresenta os resultados do ensaio de consistência pelo abatimento do tronco de cone nos concretos produzidos com a adição do resíduo Terra de Shredder nas duas relações a/c utilizadas, comparados aos concretos de referência.

Figura 46 – Consistência pelo abatimento do tronco de cone dos concretos produzidos com Terra de Shredder

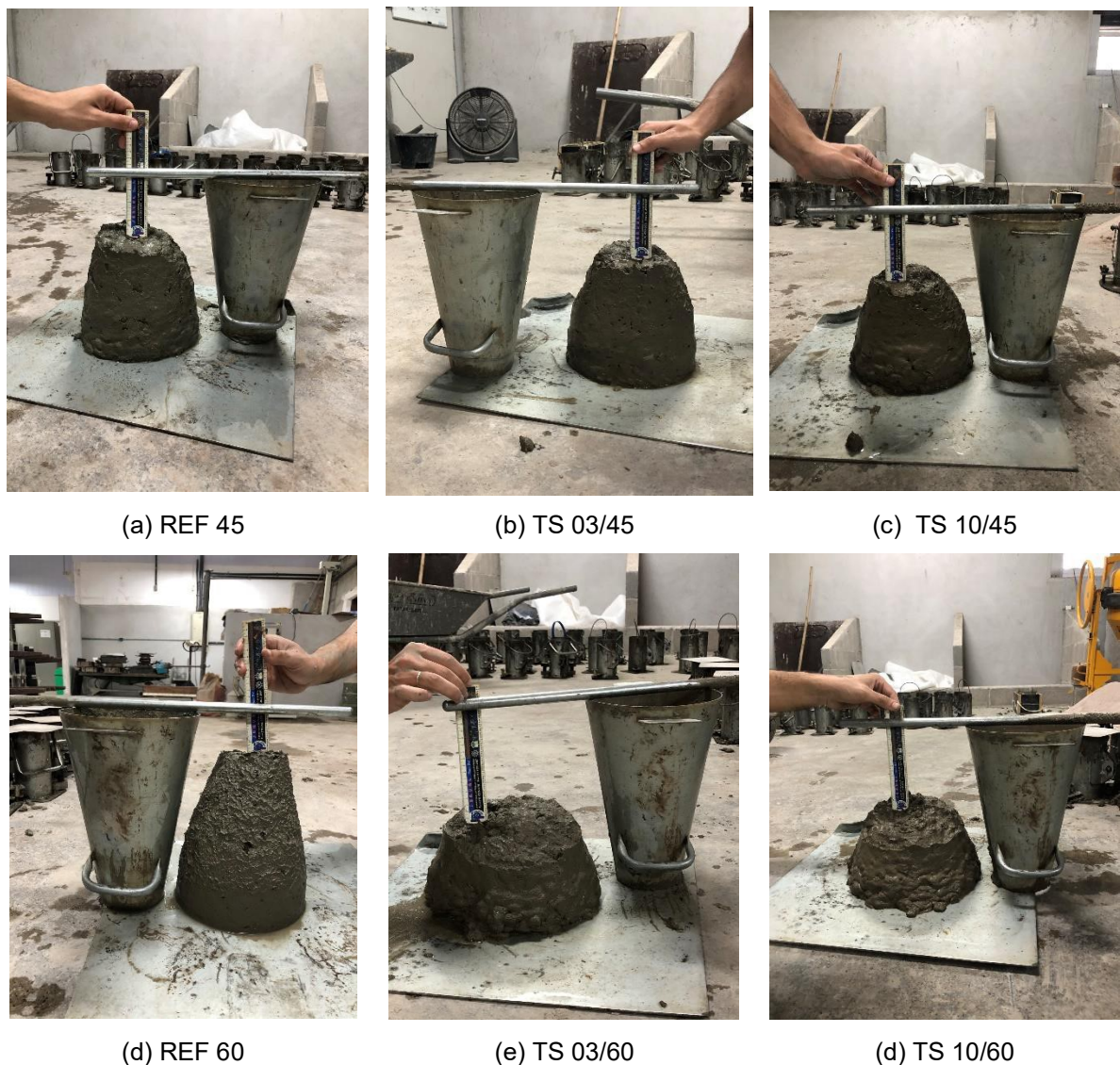


Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Percebe-se que para a relação a/c de 0,45, o abatimento teve um aumento progressivo de 10 mm com o aumento do teor de resíduo. Já para a relação a/c de 0,60 também houve um aumento, porém não foi contínuo, atingindo valores bem maiores que o de referência nas misturas com a adição do resíduo, sendo que o traço com 3% de resíduo foi o maior deles. A Figura 47 mostra o ensaio realizado em todos os traços produzidos.

Por ser um material pouco conhecido quando aplicado ao concreto, não há uma explicação baseada em outros estudos que possa embasar o resultado encontrado. É possível supor que a finura do material atingida com o processo de beneficiamento tenha contribuído para a maior trabalhabilidade das misturas. Apesar das diferenças entre os resultados encontrados, percebeu-se durante o ensaio que os concretos apresentaram homogeneidade e coesão, observando o completo envolvimento dos agregados pela pasta.

Figura 47 – Abatimento de tronco de cone dos concretos produzidos com Terra de Shredder

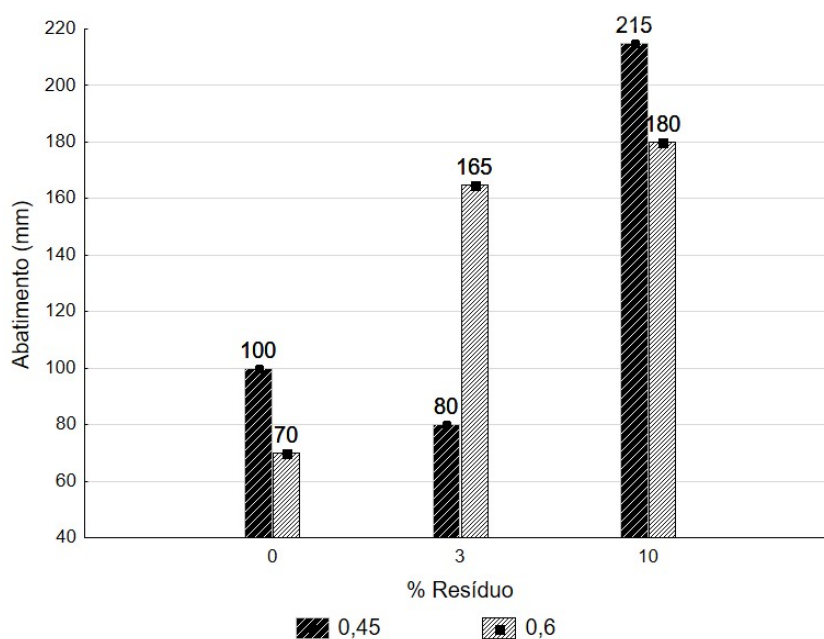


Fonte: Acervo da autora (2021).

4.3.1.2 *Consistência pelo abatimento do tronco de cone dos concretos produzidos com adição de pó de FEA*

A Figura 48 apresenta os resultados do ensaio de consistência pelo abatimento do tronco de cone nos concretos produzidos com a adição do resíduo pó de FEA nas duas relações a/c utilizadas, comparados aos concretos de referência.

Figura 48 – Consistência pelo abatimento do tronco de cone dos concretos produzidos com Pó de FEA



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Ao avaliar os resultados dos abatimentos das misturas, com exceção do percentual de adição de 3% com relação a/c 0,45, nota-se uma tendência de aumento do abatimento com o aumento do teor de adição. Isso indica uma melhora na trabalhabilidade dos concretos produzidos com adição de pó de FEA.

O uso de adições no concreto com elevadas superfícies específicas tende a aumentar a demanda de água, reduzindo a trabalhabilidade e o abatimento. Isto pode ser minimizado com o uso de aditivos plastificantes e superplastificantes (SILVA; BATTAGIN; GOMES, 2017).

No caso dos concretos produzidos com adição de pó de FEA, apesar da elevada superfície específica do material (11656,15 cm²/g), o efeito observado foi contrário. Ocorreu uma melhora no abatimento das misturas com a adição do resíduo, com exceção da mistura com o teor de 3% e relação a/c 0,45, que apresentou abatimento menor que o concreto de referência com mesma relação a/c, o que pode ter sido resultado de algum fator externo, como tempo de betoneira ou temperatura ambiente diferente entre as concretagens. É importante salientar que em nenhuma das misturas foi feito o uso de aditivos superplastificantes.

De acordo com Vargas, Masuero e Vilela (2004), o aumento da fluidez e trabalhabilidade das misturas produzidas com pó de FEA pode estar associado ao formato esférico das partículas, como visto na análise microestrutural, o que pode proporcionar um efeito de rolamento na mistura.

Al-Zaid, Al-Sugair e Al-Negheimish (1997) também observaram em seu estudo que com o aumento do teor de pó de FEA no concreto o abatimento foi ligeiramente aumentado e atribuíram a isto o fato do resíduo ser um material muito fino. Maslehuddin et al. (2011) mostraram que a substituição do cimento por 2% em massa de pó de FEA na produção de concretos aumentou a trabalhabilidade da mistura.

A Figura 49 mostra o ensaio de abatimento de tronco de cone realizado em todas as misturas com adição do resíduo e os concretos de referência. Assim como naqueles produzidos com adição de Terra de Shredder, foi possível notar que os concretos com pó de FEA apresentaram homogeneidade e coesão.

Figura 49 – Abatimento de tronco de cone dos concretos produzidos com pó de FEA



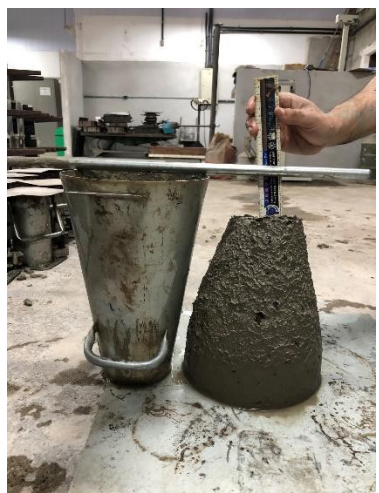
(a) REF 45



(b) PF 03/45



(c) PF 10/45



(d) REF 60



(e) PF 03/60



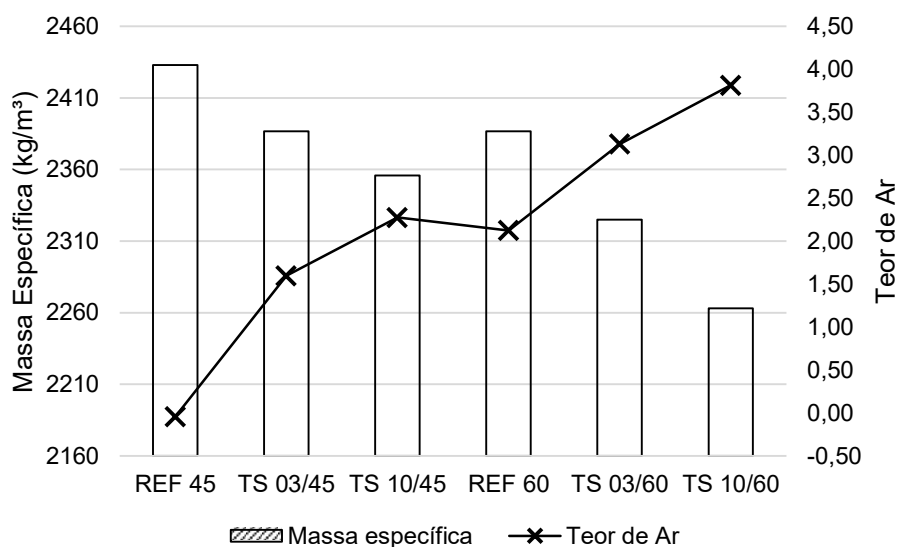
(d) PF 10/60

Fonte: Acervo da autora (2021).

4.3.2 Massa específica e Teor de ar aprisionado

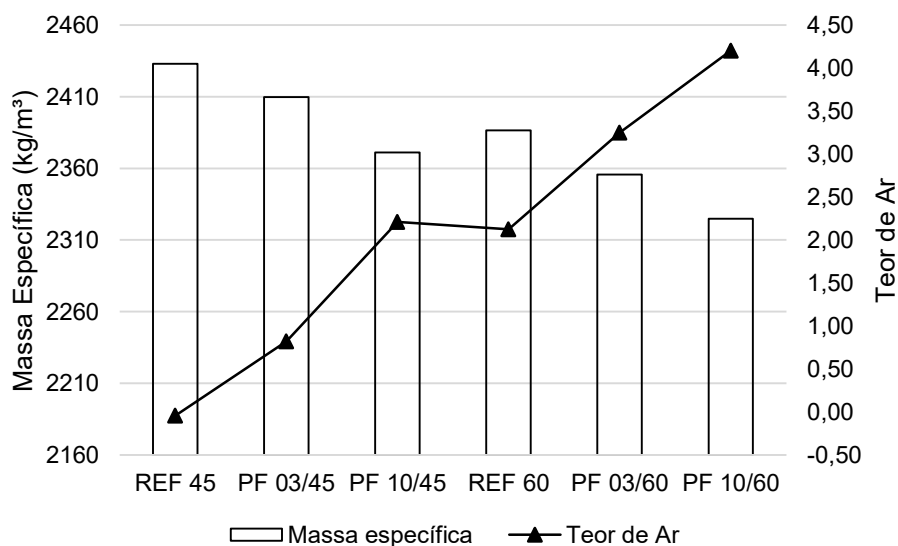
Os resultados encontrados para a massa específica e o teor de ar aprisionado nos concretos produzidos com o resíduo Terra de Shredder e pó de FEA estão apresentados na Figura 50 e Figura 51, respectivamente.

Figura 50 – Massa específica e teor de ar aprisionado dos concretos com adição de Terra de Shredder



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Figura 51 – Massa específica e teor de ar aprisionado dos concretos com adição de pó de FEA



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Para os dois resíduos e para as duas relações a/c utilizadas foi possível perceber um comportamento semelhante com relação à massa específica e o teor de ar aprisionado das misturas produzidas. Os concretos produzidos com a relação a/c 0,45 apresentaram maiores valores de massa específica quando comparados aos de 0,60,

sendo que entre os concretos de referência, essa diferença foi de aproximadamente 2%.

Com a incorporação de resíduo, principalmente do pó de FEA, que apresenta uma massa específica elevada quando comparada ao cimento utilizado, esperava-se também um aumento da massa específica do concreto, o que não foi observado. Pelo contrário, à medida que o teor de resíduo aumentou nas misturas, a massa específica diminuiu. Este comportamento pode estar associado ao aumento do teor de ar aprisionado na mistura que ocorre durante o procedimento de moldagem e adensamento dos concretos, que foi feito manualmente, de acordo com a NBR 5738 (ABNT, 2015). É possível observar nos gráficos que à medida que a massa específica dos concretos diminuiu, o teor de ar aumenta, justificando os valores encontrados.

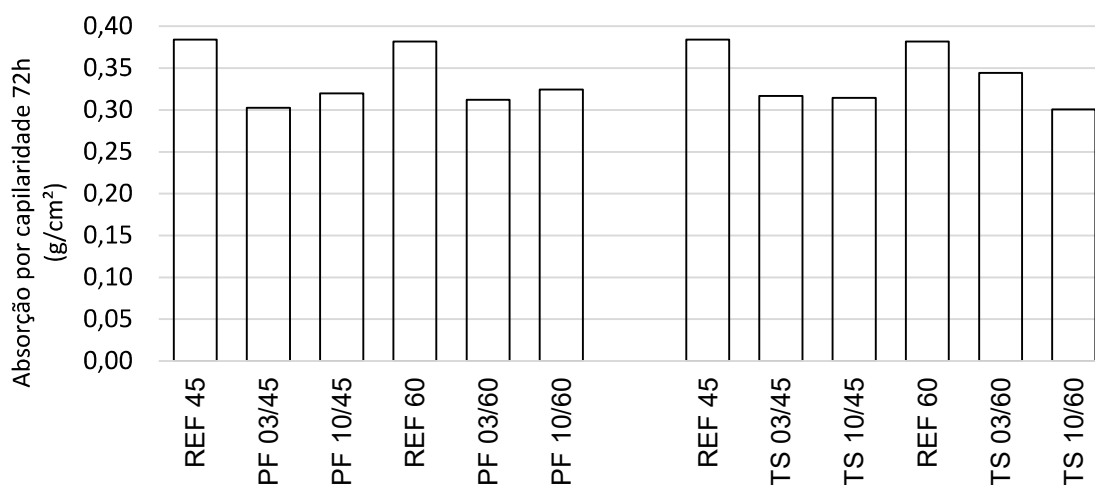
Como não houve o uso de aditivo incorporador de ar, os resultados de teor de ar encontrados devem-se ao ar aprisionado à mistura durante o procedimento de homogeneização e adensamento. Segundo Mehta de Monteiro (2008), os vazios de ar aprisionado podem chegar a 3 mm e afetar negativamente a resistência do concreto e aumentar a porosidade, afetando também a sua durabilidade.

4.4 ENSAIOS DE DURABILIDADE NO ESTADO ENDURECIDO

4.4.1 Absorção por capilaridade

Os resultados do ensaio nos concretos produzidos podem ser observados na Figura 52.

Figura 52 – Absorção média dos concretos com adição de Terra de Shredder e pó de FEA



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

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.

A seguir, serão apresentados os resultados do ensaio de absorção por capilaridade, avaliando os dois tipos de resíduos utilizados na produção dos concretos individualmente, com base na análise de variância (ANOVA).

4.4.1.1 Absorção por capilaridade dos concretos produzidos com adição de Terra de Shredder

Na Tabela 18 tem-se o resultado da análise de variância (ANOVA) para os concretos produzidos com adição do resíduo Terra de Shredder e foi constatado, a um nível de confiabilidade de 95%, que apenas a variável isolada %Resíduo foi significativa.

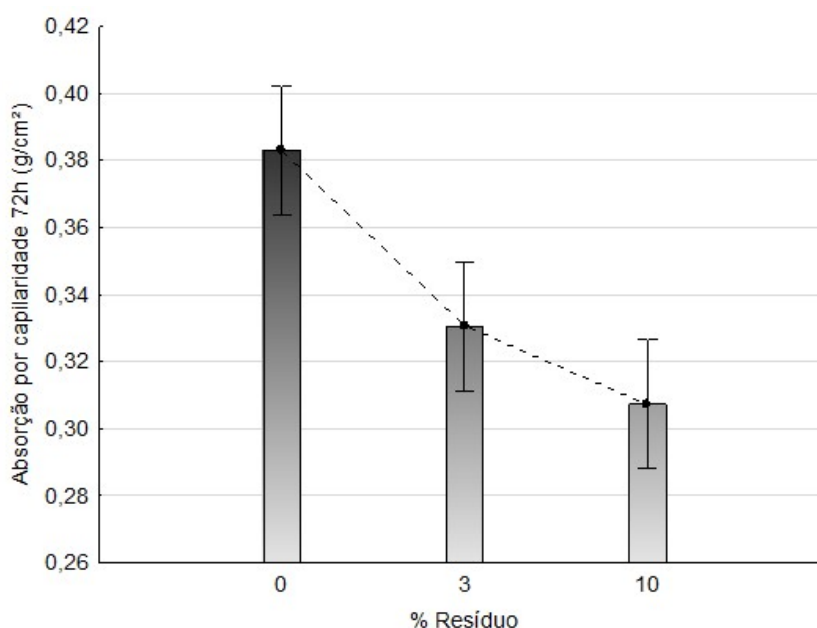
Tabela 18 – Análise de Variância da absorção por capilaridade dos concretos com adição de Terra de Shredder

Fatores de Variação	Soma dos Quadrados	Grau de Liberdade	Variância	Valor de F	Valor de P	Significância
%Resíduo	0,017985	2	0,008993	19,178	0,000183	Sim
Relação a/c	0,000064	1	0,000064	0,137	0,717965	Não
%Resíduo*Relação a/c	0,001347	2	0,000674	1,436	0,275897	Não
Erro	0,005627	12	0,000469			

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

A Figura 53 mostra o gráfico do efeito isolado da variação da porcentagem de resíduo utilizada sobre a média dos resultados de absorção capilar. Percebe-se uma tendência de redução da absorção capilar com o aumento do teor de adição de resíduo. 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 e de 20% para os concretos com 10% de adição. É possível que o resíduo tenha contribuído para um maior empacotamento da matriz cimentícia devido à finura dos grãos alcançada na moagem do material. Assim, quanto maior o teor de adição, menor a absorção por capilaridade.

Figura 53 – Gráfico do efeito isolado da variação do percentual de resíduo Terra de Shredder sobre a média dos resultados de absorção capilar



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Ao utilizar o resíduo Terra de Shredder como substituição à areia natural na fabricação de peças de concreto para pavimentação, Caetano (2016) observou que o material produzido atendeu aos limites de norma para a absorção, ou seja, o resíduo não foi danoso ao concreto produzido no quesito absorção de água.

4.4.1.2 Absorção por capilaridade dos concretos produzidos com adição de Pó de FEA

Na Tabela 19 tem-se o resultado da análise de variância (ANOVA) para os concretos produzidos com adição do resíduo pó de FEA e foi constatado a um nível de confiabilidade de 95% que apenas a variável isolada %Resíduo foi significativa.

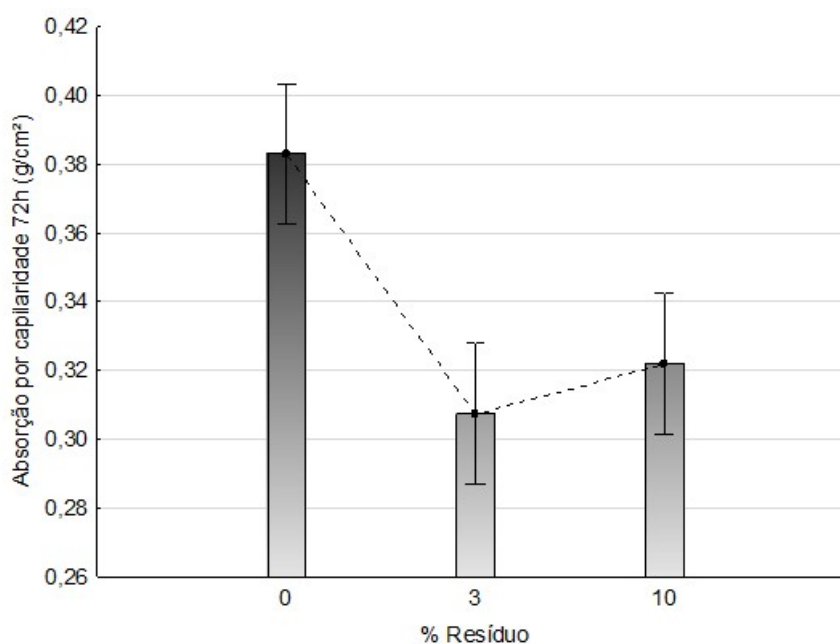
Tabela 19 – Análise de Variância da absorção por capilaridade dos concretos com adição de pó de FEA

Fatores de Variação	Soma dos Quadrados	Grau de Liberdade	Variância	Valor de F	Valor de P	Significância
%Resíduo	0,019280	2	0,009640	18,154	0,000235	Sim
Relação a/c	0,000076	1	0,000076	0,143	0,711534	Não
%Resíduo*Relação a/c	0,000108	2	0,000054	0,102	0,903697	Não
Erro	0,006372	12	0,000531			

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

A Figura 54 apresenta o gráfico do efeito isolado da variação do percentual de resíduo sobre a média dos resultados de absorção. Nota-se que os concretos produzidos com adição do resíduo pó de FEA foram consideravelmente melhores que os concretos de referência, com uma tendência de diminuição dos valores de absorção capilar. Entre os concretos com adição, aqueles com o percentual de 3% de resíduo obtiveram melhor resultado entre eles. Com relação ao concreto de referência, houve uma diminuição de aproximadamente 19% na absorção por capilaridade dos concretos com 3% de adição de resíduo e de 16% para os concretos com 10% de adição.

Figura 54 – Gráfico do efeito isolado da variação do percentual de resíduo pó de FEA sobre a média dos resultados de absorção capilar



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Maslehuddin et al. (2011) também observaram melhora na absorção de água em concretos produzidos com o pó de FEA como substituição ao cimento, com uma diminuição na faixa de 11,3 a 13,9% comparado aos concretos sem a utilização do resíduo. Este efeito pode estar associado à formação de novos produtos hidratados na matriz cimentícia devido à interação dos íons zinco do pó de FEA com o cimento, densificando a matriz, reduzindo os poros capilares e conseqüentemente a absorção de água.

4.4.2 Potencial de corrosão

O ensaio teve início aos 28 dias de idade dos concretos. 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%, conforme Tabela 20.

Tabela 20 – Zona de probabilidade de corrosão para o eletrodo de cobre/sulfato de cobre

ELETRODO (ECS)	CORROSÃO ELETROQUÍMICA: PROBABILIDADE		
	< 10%	10% - 90% (incerta)	> 90%
Cu/CuSO ₄ , Cu ²⁺ (ASTM C 876)	>-0,200 V	(-0,200V) – (0,350V)	< -0,350 V

Fonte: Adaptado de Ribeiro et al. (2012).

A seguir, serão apresentados os resultados do ensaio, analisando os dois tipos de resíduos utilizados na produção dos concretos individualmente, com base na análise de variância (ANOVA).

4.4.2.1 Potencial de corrosão nos concretos produzidos com adição de Terra de Shredder

Os dados do ensaio de potencial de corrosão foram submetidos à ANOVA e os resultados podem ser observados na Tabela 21. As variáveis significativas foram o ciclo/idade e a relação a/c, ambos de maneira isolada. A interação entre as três variáveis juntas também foi significativa.

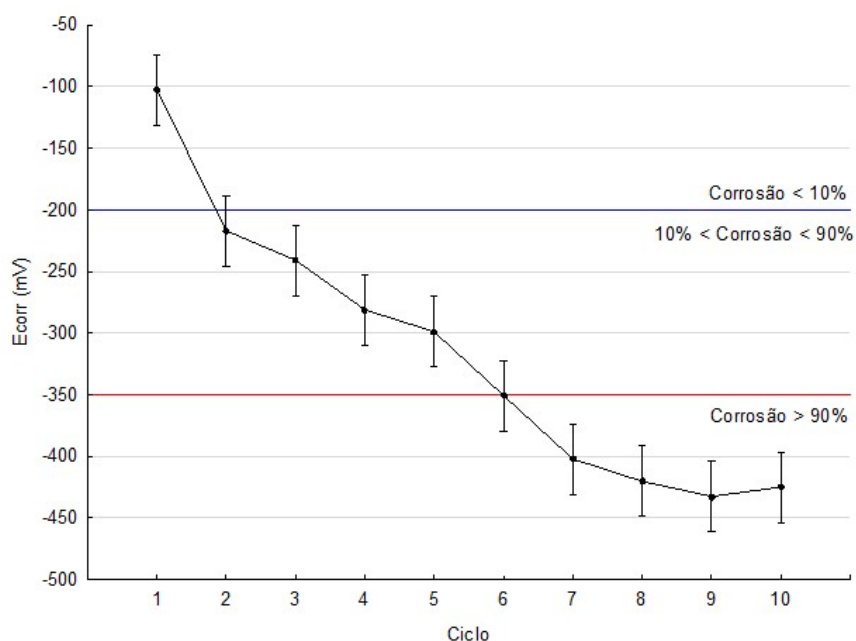
Tabela 21 – Análise de Variância do potencial de corrosão dos concretos com adição de Terra de Shredder

Fatores de Variação	Soma dos Quadrados	Grau de Liberdade	Variância	Valor de F	Valor de P	Significância
Ciclo/idade	2579357	9	286595	56,998	0,000000	Sim
%Resíduo	28066	2	14033	2,791	0,064023	Não
Relação a/c	23542	1	23542	4,682	0,031796	Sim
Ciclo*%Resíduo	146906	18	8161	1,623	0,058320	Não
Ciclo*Relação a/c	62404	9	6934	1,379	0,200508	Não
%Resíduo*Relação a/c	20879	2	10439	2,076	0,128397	Não
Ciclo*%Resíduo*Relação a/c	191803	18	10656	2,119	0,006857	Sim
Erro	905063	180	5028			

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

A Figura 55 apresenta o gráfico do efeito da variação do ciclo/idade sobre a média dos resultados e é possível perceber que, assim como esperado, à medida que ocorrem os ciclos de imersão e secagem dos corpos de prova o potencial de corrosão torna-se mais negativo, aumentando a probabilidade de corrosão das armaduras. Isso ocorre devido ao aumento do teor de cloretos livres no interior do concreto, o que favorece o processo de despassivação das armaduras e conseqüentemente a corrosão. Analisando conjuntamente as duas relações a/c utilizadas e todos os percentuais de adição, as armaduras dos concretos apresentaram despassivação a partir do 6º ciclo (70 dias de idade).

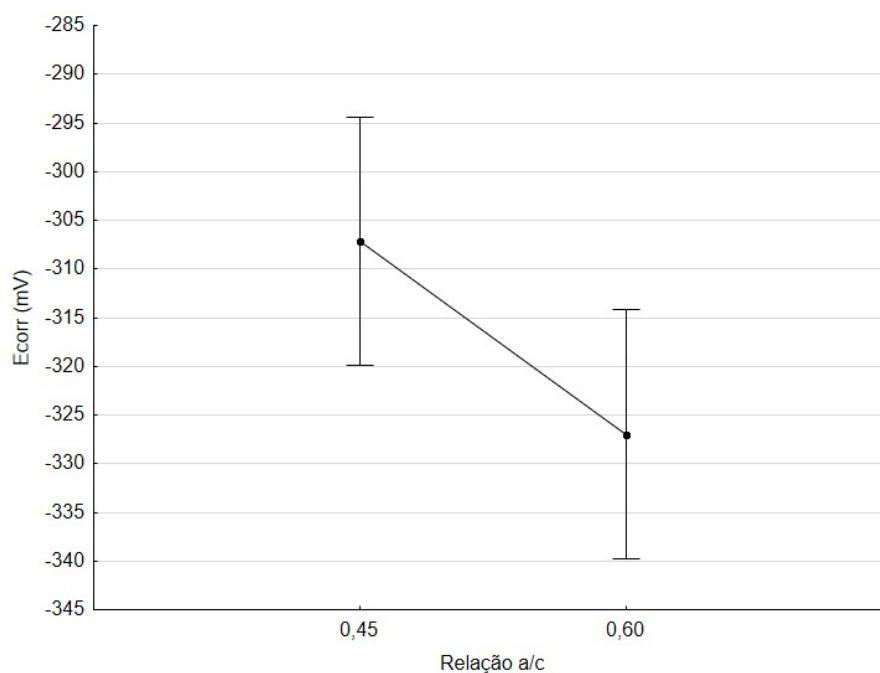
Figura 55 – Gráfico do efeito isolado da variação do ciclo (idade) sobre a média dos resultados de potencial de corrosão dos concretos com adição de Terra de Shredder



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

O gráfico do efeito isolado da variação da relação a/c sobre a média dos resultados (Figura 56) aponta que os concretos com menor relação a/c (0,45) apresentaram menor potencial de corrosão quando comparados aos de relação a/c 0,60. Cascudo (1997) afirma que com uma baixa relação a/c há a diminuição do volume de poros e permeabilidade do concreto, que retarda a difusão de cloretos e dificulta a entrada de agentes agressivos para o interior do concreto. Além disso, a corrosão em meio aquoso se dá pela presença de um eletrólito, ou seja, a água presente no interior do concreto. Assim, quanto menor a quantidade de água disponível, menor é a difusão de cloretos no interior do concreto.

Figura 56 – Gráfico do efeito isolado da variação da relação a/c sobre a média dos resultados de potencial de corrosão dos concretos com adição de Terra de Shredder

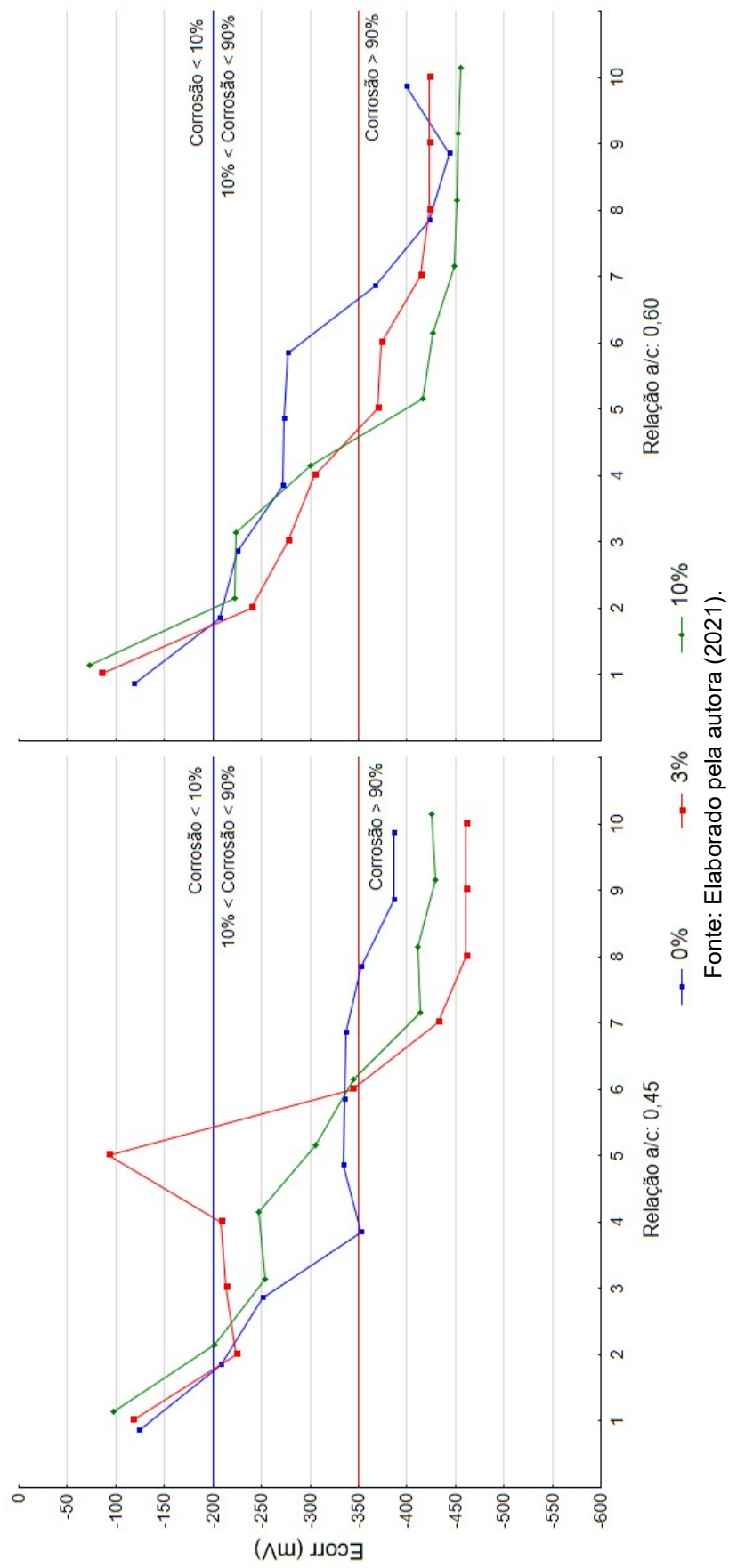


Fonte: Elaborado pela autora (2021).

No gráfico da interação entre o ciclo, a relação a/c e o percentual de resíduo (Figura 57) 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 com relação à proteção à corrosão das barras de aço. 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.

Apesar dos resultados dos concretos com adição do resíduo terem sido piores que os concretos de referência, não foi observada uma grande diferença entre eles no gráfico da relação a/c 0,45; assim como na relação a/c 0,60, já que o percentual de resíduo utilizado não foi estatisticamente significativo. Isso pode ser explicado pelo fato de que mesmo que a composição química do material seja heterogênea e possa apresentar compostos prejudiciais ao concreto, o fato de ser um material fino pode ter ajudado no preenchimento dos poros, através de um efeito microfiller, dificultando a entrada de agentes agressivos.

Figura 57 – Gráfico do efeito da interação entre o ciclo, a relação a/c e o %resíduo sobre o potencial de corrosão dos concretos com adição de Terra de Shredder



4.4.2.2 Potencial de corrosão nos concretos produzidos com adição de pó de FEA

A ANOVA dos resultados do potencial de corrosão dos concretos produzidos com adição de pó de FEA são apresentados na Tabela 22. As variáveis significativas foram o ciclo/idade, o percentual de resíduo e a relação a/c, de maneira isolada, e algumas das interações entre eles.

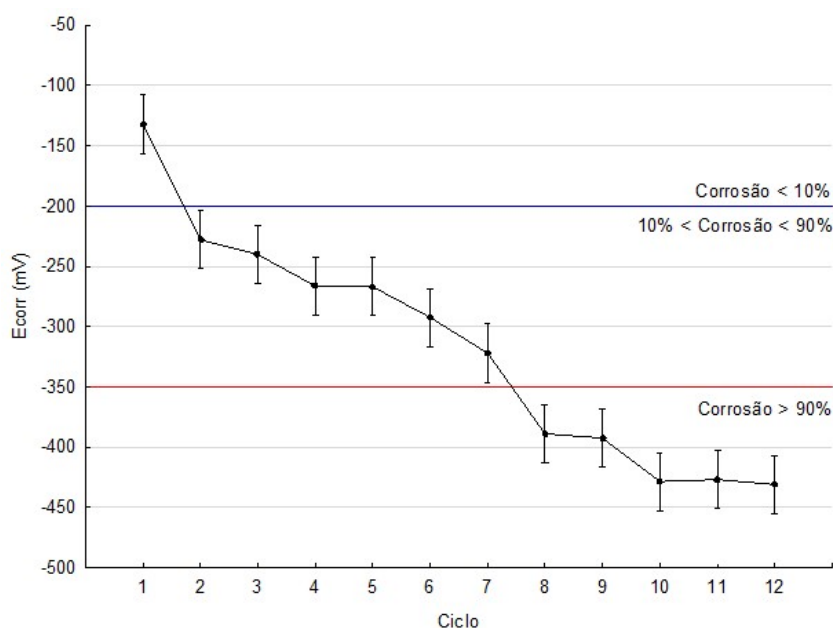
Tabela 22 – Análise de Variância do potencial de corrosão dos concretos com adição de pó de FEA

Fatores de Variação	Soma dos Quadrados	Grau de Liberdade	Variância	Valor de F	Valor de P	Significância
Ciclo/idade	2447160	11	222469	62,227	0,000000	Sim
%Resíduo	48033	2	24017	6,718	0,001478	Sim
Relação a/c	54120	1	54120	15,138	0,000133	Sim
Ciclo*%Resíduo	205593	22	9345	2,614	0,000208	Sim
Ciclo*Relação a/c	76367	11	6942	1,942	0,035632	Sim
%Resíduo*Relação a/c	42264	2	21132	5,911	0,003168	Sim
Ciclo*%Resíduo*Relação a/c	56291	22	2559	0,716	0,821250	Não
Erro	772223	216	3575			

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

No gráfico da Figura 58, que mostra o efeito isolado da variação do ciclo/idade sobre a média dos resultados de potencial de corrosão, é possível perceber que os concretos passaram a apresentar probabilidade de corrosão maior que 90% a partir do 8º ciclo de imersão e secagem, ou seja, por volta de 84 dias de idade.

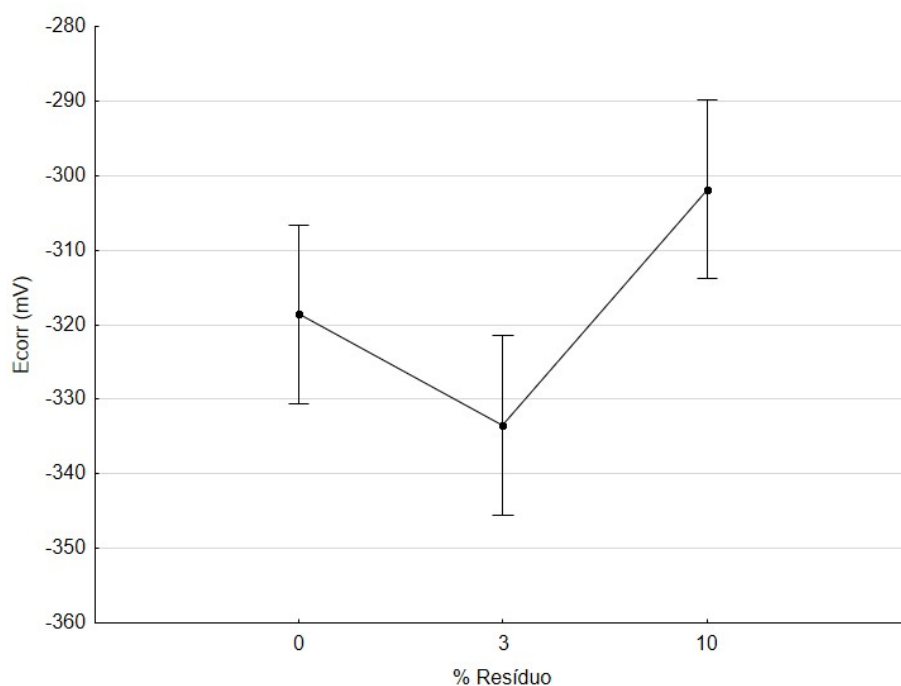
Figura 58 – Gráfico do efeito isolado da variação do ciclo (idade) sobre a média dos resultados de potencial de corrosão dos concretos com adição de pó de FEA



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

O gráfico do efeito isolado da variação do percentual de resíduo sobre a média dos resultados, apresentado na Figura 59, mostra que os concretos com 10% de adição de resíduo tiveram melhores resultados do que os concretos de referência (0% de adição) e os com adição de 3%. Mais adiante, ao analisar o efeito dos percentuais de adição de resíduo com relação ao potencial de corrosão (Figura 61), é possível perceber que o percentual de 3% na verdade teve um comportamento semelhante ao concreto de referência, não indicando ser prejudicial na proteção da corrosão das armaduras nos concretos. Já os com 10% de adição, pela maior quantidade de resíduo e, conseqüentemente, maior quantidade de zinco disponível para o processo de hidratação, apresentaram menor potencial de corrosão devido à formação de produtos hidratados que densificaram a matriz cimentícia (FARES et al., 2016; MASLEHUDDIN et al., 2011) e também há a possibilidade de ter ocorrido um efeito eletroquímico proporcionado pela interação do zinco com a matriz cimentícia.

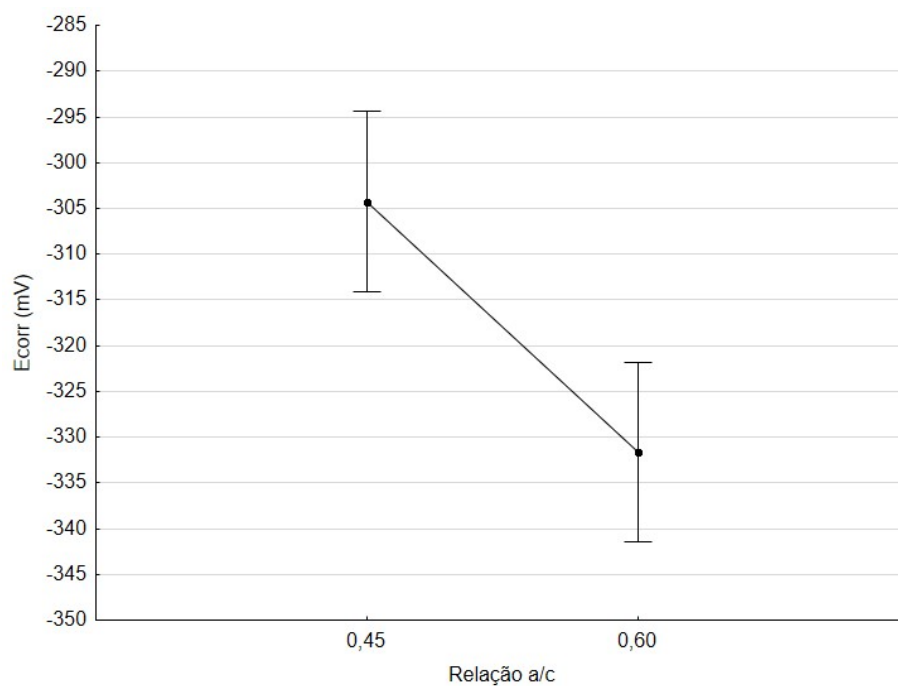
Figura 59 – Gráfico do efeito isolado da variação do percentual de resíduo sobre a média dos resultados de potencial de corrosão dos concretos com adição de pó de FEA



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

O gráfico do efeito isolado da variação da relação a/c sobre a média dos resultados de potencial de corrosão (Figura 60) mostra que os concretos produzidos com a relação a/c de 0,45 foram mais resistentes à corrosão que aqueles produzidos com relação a/c 0,60, fato que já era esperado, devido ao menor volume de poros encontrado nos concretos com menores relações a/c (CASCUDO, 1997).

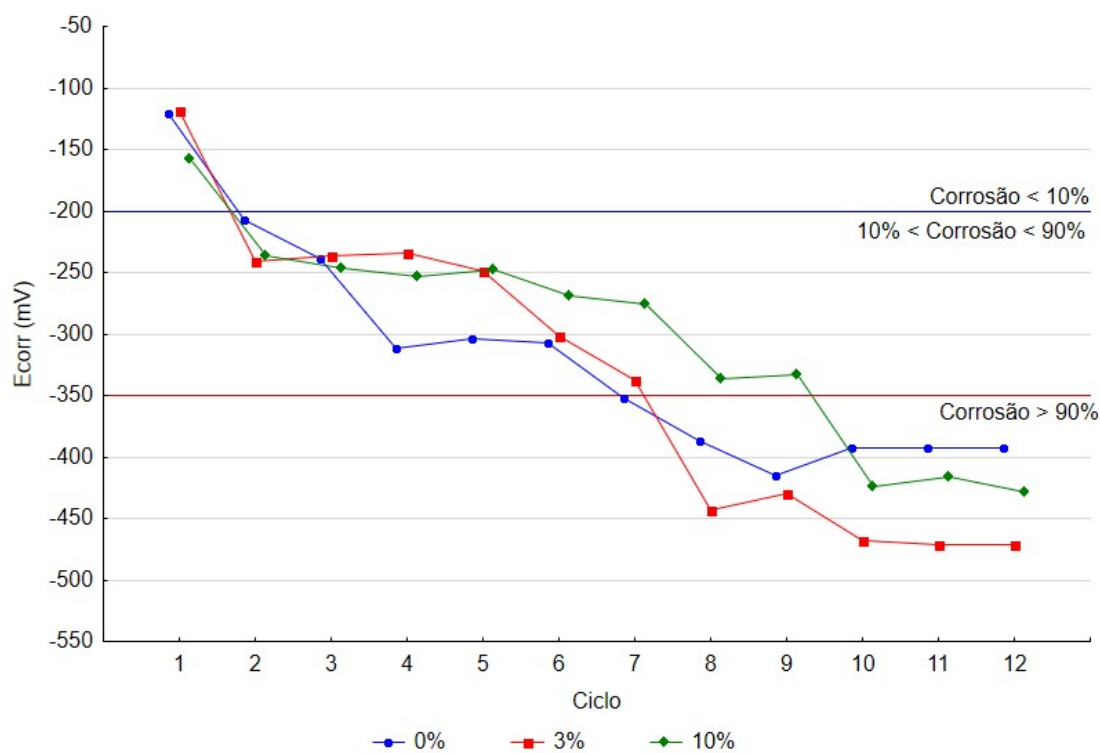
Figura 60 – Gráfico do efeito isolado da variação da relação a/c sobre a média dos resultados de potencial de corrosão dos concretos com adição de pó de FEA



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

A interação entre a idade (ciclo de ensaio) e o percentual de pó de FEA adicionado ao concreto, mostrada no gráfico da Figura 61, aponta que os concretos com adição de 10% de pó de FEA foram os que tiveram um melhor comportamento frente à corrosão, por motivos explicados anteriormente. Já os concretos de referência e com 3% de adição tiveram um comportamento semelhante.

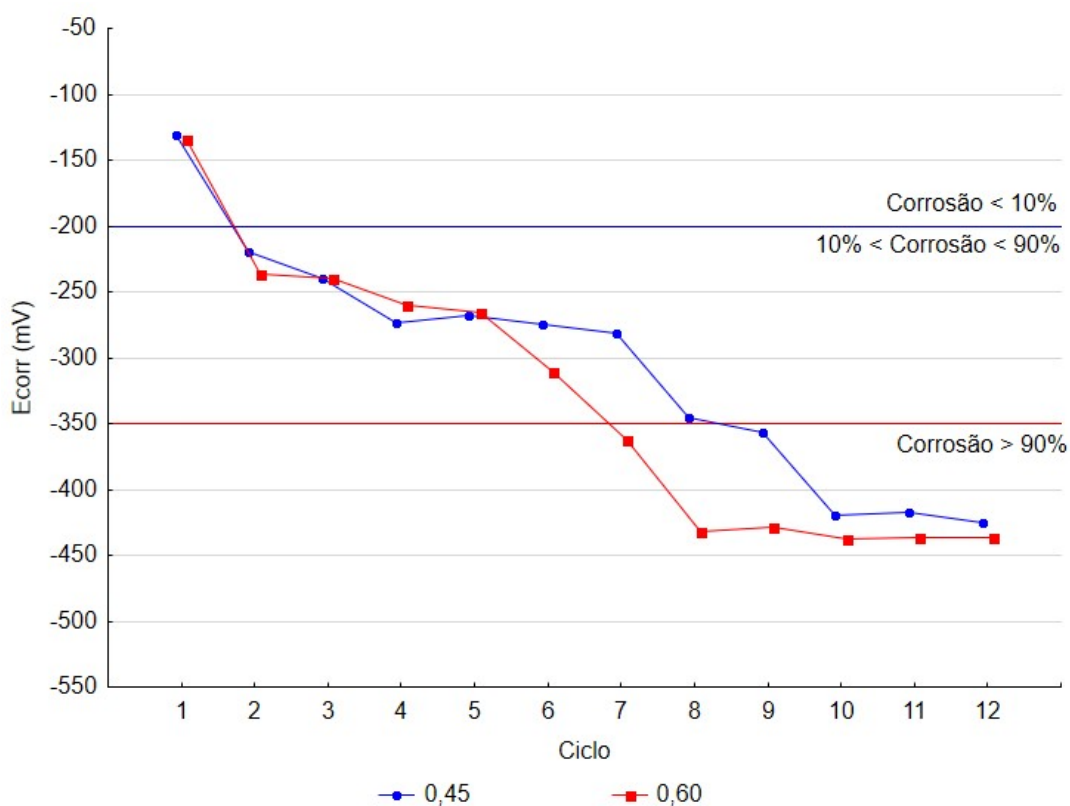
Figura 61 – Gráfico do efeito da interação entre a idade (ciclo) e o percentual de resíduo sobre o potencial de corrosão dos concretos com adição de pó de FEA



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

A interação entre a idade (ciclo de ensaio) e a relação a/c (Figura 62) mostra que, entre as duas relações a/c utilizadas, os concretos com 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 o gráfico 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 (CASCUDO, 1997).

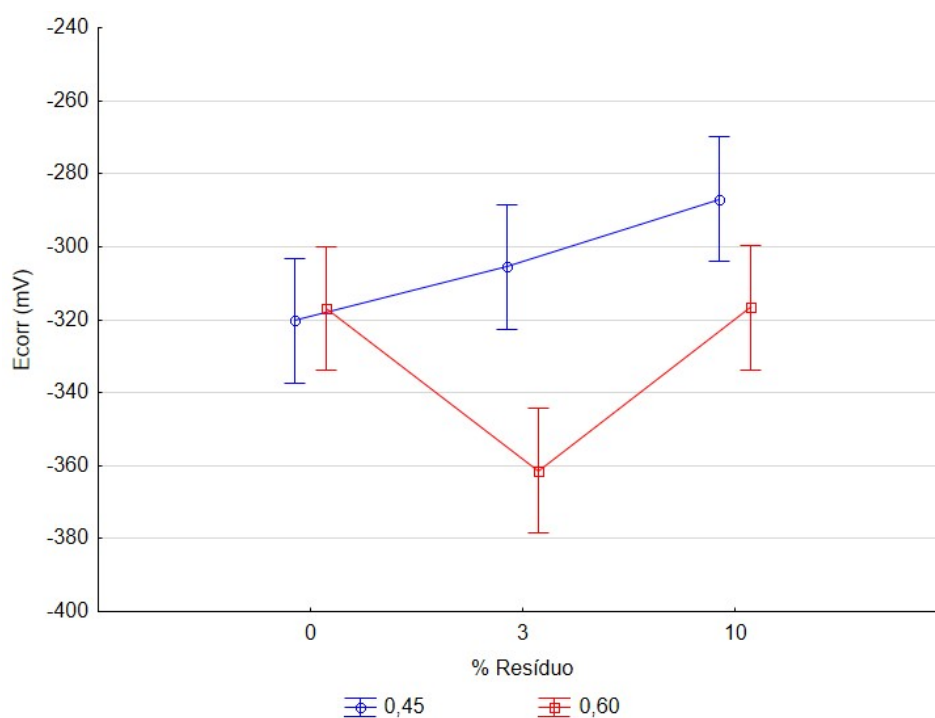
Figura 62 – Gráfico do efeito da interação entre a idade (ciclo) e a relação a/c sobre o potencial de corrosão dos concretos com adição de pó de FEA



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

A interação entre o percentual de adição de resíduo e a relação a/c, apresentada no gráfico da Figura 63, 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. Já para a 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 mesma faixa.

Figura 63 – Gráfico do efeito da interação entre o percentual de resíduo e a relação a/c sobre o potencial de corrosão dos concretos com adição de pó de FEA



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

De modo geral, analisando os gráficos apresentados e com ênfase nos concretos produzidos com relação a/c 0,45, é possível perceber um retardo no início da corrosão, indicando uma melhoria do potencial de corrosão das barras de aço inseridas nos concretos com adição de pó de FEA.

Assim como observado por Maslehuddin et 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 também 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).

Essa diferença entre as idades de início de despassivação das armaduras pode estar associada à formação de novos produtos hidratados na matriz cimentícia dos concretos produzidos com adição de pó de FEA devido à ação do zinco fornecido pelo resíduo, que contribuíram no preenchimento dos poros, e também à interação química entre o zinco e os compostos do cimento que interagiram com o ambiente alcalino em torno das barras e proporcionaram uma maior proteção. Rincón et al. (2002) afirmam que o hidrozincato de cálcio formado devido à interação do zinco durante a hidratação da pasta de cimento ajuda a manter a passividade do aço, o que garante maior proteção à corrosão das armaduras.

Ao analisar a microestrutura de pastas de cimento produzidas com incorporação de pó de FEA, Fares et al. (2016) identificaram que os íons zinco do resíduo reagem com o cimento durante o processo de hidratação e formam o hidrozincato de cálcio, que é o responsável pelo retardo na hidratação da pasta de cimento. Com o tempo, esse composto se dissocia, e o zinco reage com o silicato de cálcio hidratado (C-S-H) da matriz formando então silicato de zinco hidratado ou Z-S-H. A formação desse produto hidratado pode ser responsável pela densificação da matriz cimentícia relatado por Maslehuddin et al. (2011), pois semelhante ao C-S-H, contribui no ganho de resistência do material e no preenchimento dos poros.

Além disso, o efeito microfiller causado pelo pó e a tendência de as pequenas partículas do resíduo servirem como pontos de nucleação na hidratação do cimento também influenciam na resistência à penetração de cloretos (SOUZA et al., 2010).

Desse modo, percebe-se que a adição de pó de FEA no concreto dificulta a ação dos cloretos livres no interior do concreto. Com uma menor relação a/c da matriz, verifica-se uma melhora ainda maior, pois há uma redução do volume de poros e permeabilidade do concreto comparado ao de relação a/c maior (CASCUDO, 1997). Assim, os concretos com adição de 10% de pó de FEA e relação a/c 0,45 apresentaram menor probabilidade de corrosão devido aos fatores acima mencionados.

4.4.3 Espectroscopia por indução colorimétrica com aspersão de AgNO₃

A seguir são apresentados os resultados do ensaio colorimétrico ou espectroscopia por indução colorimétrica com aspersão de AgNO₃ nos concretos utilizados no ensaio de potencial de corrosão, para os dois resíduos estudados, após o término dos ciclos de imersão e secagem e despassivação das armaduras.

4.4.3.1 Altura de penetração de cloretos nos concretos produzidos com adição de Terra de Shredder

A Tabela 23 mostra as médias das cinco alturas de penetração de cloretos aferidas nas superfícies dos concretos produzidos com o resíduo Terra de Shredder, ensaiados com o indicador químico nitrato de prata (AgNO₃), que foram aferidas pelo software Autocad[®].

Tabela 23 – Altura média da penetração de cloretos nos concretos produzidos com Terra de Shredder

Família	Alturas Médias (Terra de Shredder)				
	h1 (cm)	h2 (cm)	h3 (cm)	h4 (cm)	h5 (cm)
REF 45	13,59	13,24	12,65	13,27	13,52
TS 03/45	13,73	12,81	12,07	12,76	13,20
TS 10/45	12,79	12,08	12,16	12,24	14,03
REF 60	14,64	14,34	14,05	14,26	14,40
TS 03/60	14,33	14,20	13,84	13,88	14,16
TS 10/60	14,06	13,88	13,67	13,77	14,60

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

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. Este comportamento está relacionado à porosidade do concreto. Quanto maior a quantidade de água na mistura, maior é o espaço inicial entre os grãos de cimento e maior é a porosidade capilar (NONAT, 2014). Essa porosidade facilita a entrada dos íons cloreto na matriz cimentícia.

Foi realizada uma análise de variância (ANOVA) das alturas obtidas nos concretos analisados a fim de verificar quais variáveis independentes têm efeito estatisticamente significativo sobre a variável “altura de penetração de cloretos”. A Tabela 24 apresenta os resultados da ANOVA realizada, verificando que apenas a variável independente relação a/c foi estatisticamente significativa.

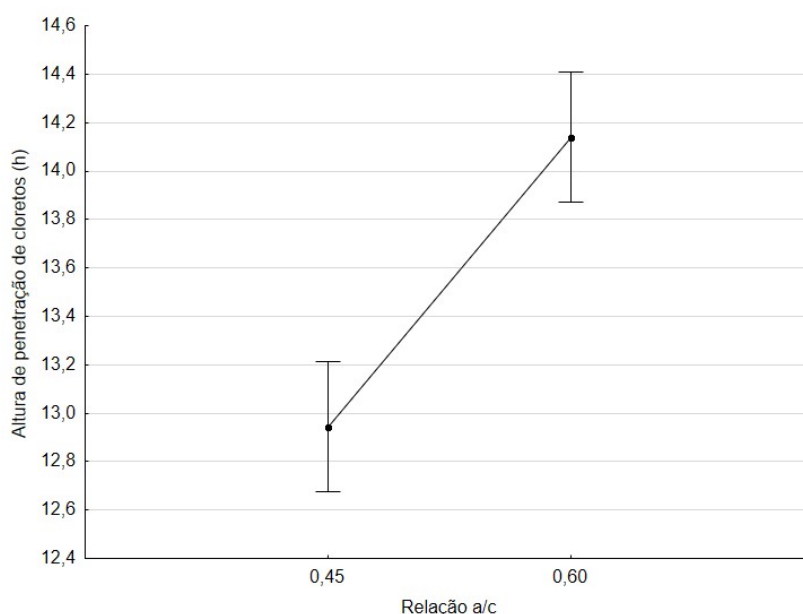
Tabela 24 – Análise de variância das alturas de penetração de cloretos dos concretos com adição de Terra de Shredder

Fatores de Variação	Soma dos Quadrados	Grau de Liberdade	Variância	Valor de F	Valor de P	Significância
%Resíduo	3,37	2	1,68	2,05	0,134664	Não
Relação a/c	32,22	1	32,22	39,28	0,000000	Sim
%Resíduo*Relação a/c	0,26	2	0,13	0,16	0,856063	Não
Erro	68,91	84	0,82			

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Observando o gráfico do efeito isolado da variação da relação a/c sobre as médias das alturas de penetração de cloretos aferidas (Figura 64), nota-se que os concretos com menor quantidade de água (a/c 0,45) obtiveram menores alturas de penetração de íons cloreto, o que já era esperado, devido a menor porosidade do material produzido.

Figura 64 – Gráfico do efeito isolado da variação da relação a/c sobre a média dos resultados de altura de penetração de cloretos nos concretos com adição de Terra de Shredder

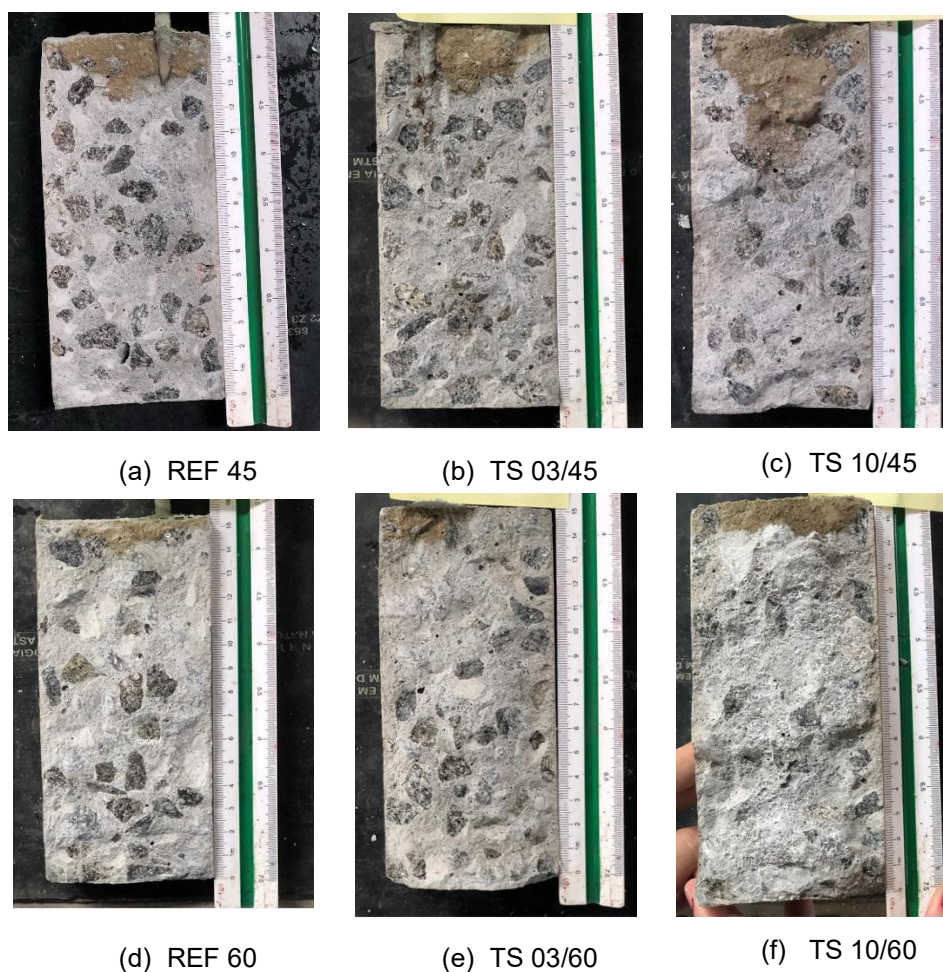


Fonte: Elaborado pela autora (2021).

A Figura 65 mostra a superfície de alguns dos corpos de prova utilizados no ensaio de potencial de corrosão rompidos e após a aspersão do indicador químico nitrato de prata. A área de coloração esbranquiçada equivale a região em que houve a precipitação de AgCl , pois a concentração de cloretos livres é superior a 0,15% em relação à massa de cimento. Na área de coloração marrom, há a presença de cloretos combinados, não nocivos ao concreto, ou seja, inativos no processo corrosivo, que precipitou na forma de Ag_2O .

Como apenas a relação a/c foi estatisticamente significativa na análise dos resultados, é difícil dizer de fato como ocorreu a frente de contaminação de cloretos nos concretos. As imagens mostram que os concretos com relação a/c 0,60 tiveram maior área de precipitação de AgCl , corroborando os resultados encontrados.

Figura 65 – Superfícies dos concretos com adição de Terra de Shredder aspergidas com o indicador químico AgNO_3



Fonte: Acervo da autora (2021).

4.4.3.2 *Altura de penetração de cloretos nos concretos produzidos com adição de pó de FEA*

A Tabela 25 mostra as médias das cinco alturas de penetração de cloretos aferidas 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. O mesmo pode ser dito sobre os concretos produzidos com adição de pó de FEA sobre a questão da porosidade devido ao maior volume de água utilizado na mistura.

Tabela 25 – Altura média da penetração de cloretos nos concretos produzidos com pó de FEA

Família	Alturas Médias (Pó de FEA)				
	h1 (cm)	h2 (cm)	h3 (cm)	h4 (cm)	h5 (cm)
REF 45	13,59	13,24	12,65	13,27	13,52
PF 03/45	14,21	13,26	12,65	13,26	14,16
PF 10/45	13,42	12,55	12,57	12,54	13,00
REF 60	14,64	14,34	14,05	14,26	14,40
PF 03/60	14,49	14,60	14,24	14,14	14,13
PF 10/60	14,27	13,48	13,90	13,90	14,43

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Foi realizada uma análise de variância (ANOVA) das alturas obtidas nos concretos analisados a fim de verificar quais variáveis independentes têm efeito estatisticamente significativo sobre a variável “altura de penetração de cloretos”. A Tabela 26 apresenta os resultados da ANOVA realizada, verificando que as duas variáveis independentes analisadas foram significativas, porém a interação entre elas não.

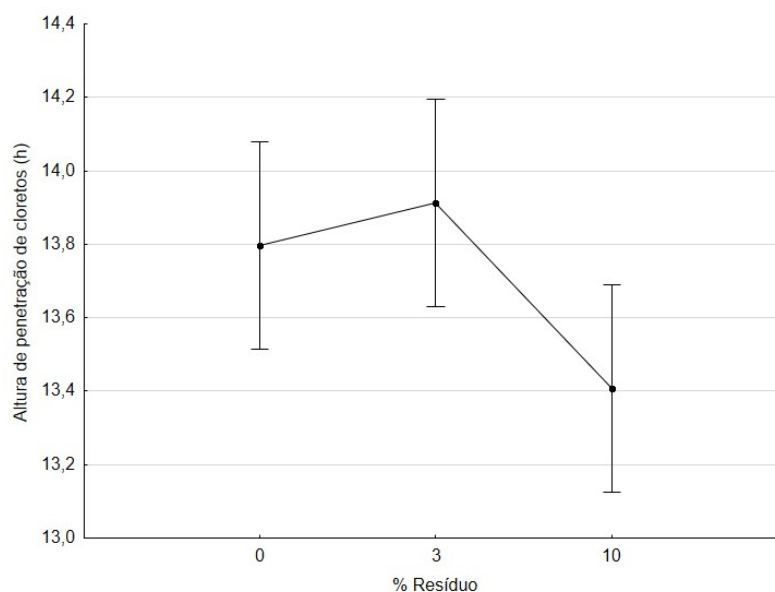
Tabela 26 – Análise de variância das alturas de penetração de cloretos dos concretos com adição de pó de FEA

Fatores de Variação	Soma dos Quadrados	Grau de Liberdade	Variância	Valor de F	Valor de P	Significância
%Resíduo	4,21	2	2,11	3,48	0,035181	Sim
Relação a/c	23,66	1	23,66	39,15	0,000000	Sim
%Resíduo*Relação a/c	0,56	2	0,28	0,46	0,630743	Não
Erro	50,78	84	0,60			

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

O gráfico da Figura 66, que mostra o efeito isolado da variação do percentual de adição de resíduo sobre a média dos resultados de altura de penetração de cloretos nos concretos corrobora o resultado do ensaio de potencial de corrosão, o qual mostra também que os concretos com 10% de adição de pó de FEA foram melhores frente à ação dos cloretos.

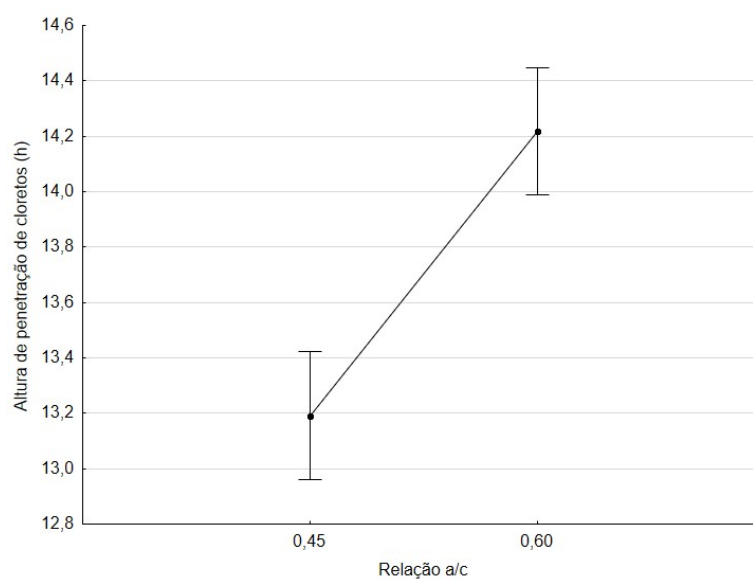
Figura 66 – Gráfico do efeito isolado da variação do percentual de resíduo sobre a média dos resultados de altura de penetração de cloretos nos concretos com adição de pó de FEA



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Seguindo o mesmo padrão do ensaio de potencial de corrosão, o efeito isolado da variação da relação a/c mostrado no gráfico da Figura 67 também mostra que os concretos com relação a/c 0,45 apresentaram melhor desempenho que os de relação a/c 0,60.

Figura 67 – Gráfico do efeito isolado da variação da relação a/c sobre a média dos resultados de altura de penetração de cloretos nos concretos com adição de pó de FEA

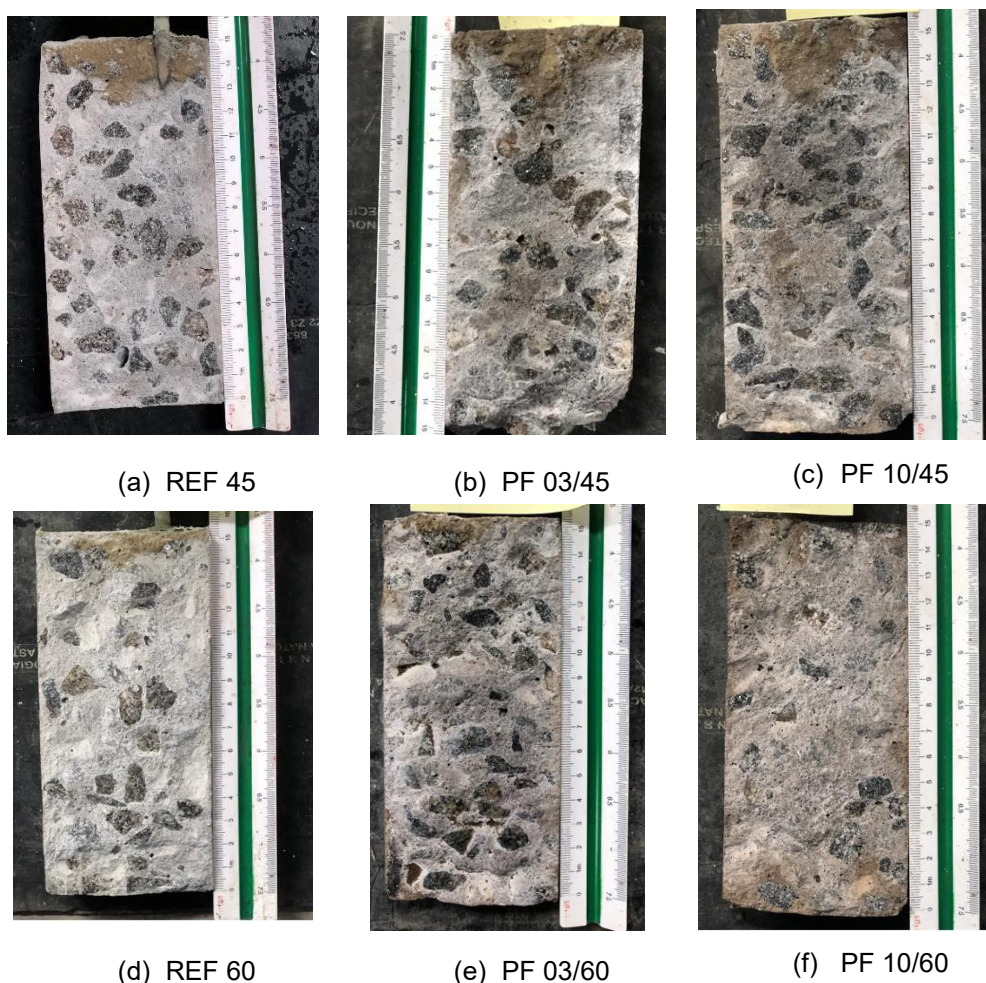


Fonte: Elaborado pela autora (2021).

A Figura 68 mostra a superfície dos corpos de prova rompidos após o ensaio de potencial de corrosão e aspergidos com o indicador químico nitrato de prata. Assim como explicado anteriormente, a área de coloração esbranquiçada equivale a região em que ocorreu a precipitação de AgCl , pois a concentração de cloretos livres é superior a 0,15% em relação à massa de cimento. Na área de coloração marrom, há a presença de cloretos combinados, não nocivos ao concreto, ou seja, inativos no processo corrosivo, que precipitou na forma de Ag_2O .

Pelas imagens, percebe-se que os concretos com relação a/c 0,60 apresentaram maior área de precipitação de AgCl (coloração esbranquiçada) quando comparados aos de 0,45, estando de acordo com os resultados estatísticos apresentados anteriormente

Figura 68 – Superfícies dos concretos com adição de pó de FEA aspergidas com o indicador químico AgNO_3



Fonte: Acervo da autora (2021).

4.5 AVALIAÇÃO DA LIXIVIAÇÃO DE CONTAMINANTES

A caracterização ambiental dos resíduos mostrou que a Terra de Shredder foi classificada pela NBR 10004 (ABNT, 2004) como resíduo não-perigoso e não-inerte, Classe II A, enquanto o pó de FEA foi classificado como resíduo perigoso, Classe I, como discutido nas seções 5.1.5 e 5.2.5. Porém esta classificação restringe-se ao material em seu estado natural.

Levando-se em conta a aplicação de resíduos siderúrgicos em matrizes cimentícias, visando garantir não apenas o bom desempenho das estruturas de concreto produzidas com esses materiais, como também a segurança e saúde dos usuários e a preservação do meio ambiente após o fim da vida útil do material, a aplicação da referida norma não é suficiente. Desse modo, os resultados de lixiviação acumulada para os concretos produzidos com adição dos resíduos siderúrgicos são mostrados a seguir.

4.5.1 Lixiviação de contaminantes nos concretos produzidos com adição de Terra de Shredder

Na Tabela 27 é possível observar a lixiviação acumulada para os concretos produzidos com adição do resíduo Terra de Shredder durante os 64 dias de ensaio.

Tabela 27 – Lixiviação acumulada nos concretos produzidos com adição de Terra de Shredder

Lixiviação acumulada (mg/m ²)	As	Cd	Co	Cr	Se	Pb	Mn	Hg	Zn
REF 45	<LD	<LD	0,0385	0,0683	<LD	0,0423	0,0699	<LD	0,361
TS 03/45	0,0196	0,0011	0,0211	0,8139	<LD	0,0433	0,0274	0,0032	0,424
TS 10/45	0,0607	<LD	0,0540	0,8567	<LD	0,1261	0,1521	0,0042	1,407
REF 60	<LD	<LD	0,0454	0,4271	<LD	0,0274	0,0303	<LD	<LD
TS 03/60	0,0473	0,0034	0,0444	1,3348	<LD	0,0919	0,1638	<LD	0,728
TS 10/60	0,0558	<LD	0,0797	0,9215	<LD	0,1116	0,1603	0,0109	1,738
U1 (mg/m²)	40	1	25	150	1,5	100	-	0,4	200
U2 (mg/m²)	300	7,5	200	950	9,5	800	-	2,0	1500

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Nota-se que nenhum dos traços de concreto produzidos ultrapassou os limites de U1 e U2 estabelecidos pela norma, não apresentando assim restrição ambiental relacionada ao seu uso.

Dentre os metais avaliados, o zinco foi o que apresentou maior lixiviação entre os demais elementos, principalmente nos concretos com 10% de adição, porém em quantidades bem menores comparadas aos limites U1 e U2. O cromo também apresentou valores um pouco maiores comparados aos demais metais. Nota-se também que os concretos produzidos com a relação a/c menor apresentaram menor lixiviação dos metais, efeito da redução dos poros na matriz, o que reduz a ação do lixiviante no concreto.

Na análise ambiental dos resíduos em pó, a Terra de Shredder apresentou solubilidade em água maior que o limite estabelecido em norma para os metais manganês, chumbo e arsênio, o que o classificou como resíduo não-perigoso e não-inerte. Já na análise de lixiviação de contaminantes dos concretos, esses mesmos elementos não ultrapassaram o limite de norma, indicando o encapsulamento dos metais. Apesar de a norma EA NEN 7345 (NNI, 1995) não apresentar limites de U1 e U2 para o manganês, a quantidade lixiviada foi bem pequena, comparando-a aos demais metais avaliados.

Um pH alcalino contribui na fixação de metais na matriz cimentícia, pois com a redução do pH há uma maior liberação de íons da matriz cimentícia para o lixiviado. Além disso, a alcalinidade da matriz colabora na manutenção de um pH alcalino do lixiviado, devido à dissolução dos compostos de cálcio do concreto (OLIVEIRA et al., 2015).

Caetano, Schalch e Pablos (2020) avaliaram a lixiviação de contaminantes de blocos de concreto para pavimentação produzidos com frações do resíduo Terra de Shredder como substituição ao agregado miúdo e classificaram os blocos como não-perigosos e não-inertes, pois ocorreu o encapsulamento de 6 dos 8 elementos tóxicos presentes no resíduo, sendo um deles o cádmio que, assim como nesta pesquisa, também foi encontrado nos concretos convencionais (sem adição de resíduo).

Desse modo, concretos contendo adição do resíduo Terra de Shredder são considerados seguros do ponto de vista ambiental, no que tange aos critérios de lixiviação de contaminantes.

4.5.2 Lixiviação de contaminantes nos concretos produzidos com adição de Pó de FEA

A Tabela 28 mostra os resultados de lixiviação acumulada durante os 64 dias de ensaio para os concretos produzidos com adição de pó de FEA.

Tabela 28 – Lixiviação acumulada nos concretos produzidos com adição de pó de FEA

Lixiviação acumulada (mg/m ²)	As	Cd	Co	Cr	Se	Pb	Mn	Hg	Zn
REF 45	<LD	<LD	0,0385	0,0683	<LD	0,0423	0,0699	<LD	0,361
PF 03/45	0,0154	0,0024	0,0577	0,6109	<LD	0,3615	0,1036	<LD	3,602
PF 10/45	<LD	0,0013	0,0238	0,0937	0,07459	0,5363	0,0222	<LD	2,999
REF 60	<LD	<LD	0,0454	0,4271	<LD	0,0274	0,0303	<LD	<LD
PF 03/60	0,0069	0,0067	0,0448	0,0738	<LD	1,5190	0,0613	<LD	3,558
PF 10/60	0,0392	0,0059	0,0700	0,1976	0,31710	9,7101	0,0550	<LD	6,123
U1 (mg/m ²)	40	1	25	150	1,5	100	-	0,4	200
U2 (mg/m ²)	300	7,5	200	950	9,5	800	-	2,0	1500

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Assim como para o resíduo Terra de Shredder, nenhum dos concretos produzidos com adição de pó de FEA ultrapassou os limites U1 e U2, não apresentando então restrição ambiental relacionada ao seu uso.

Entre os metais analisados, o zinco foi o que apresentou maiores valores de lixiviação, como já esperado, devido à composição química do material ser predominantemente zinco e ferro.

Além disso, o chumbo também apresentou valores de lixiviação um pouco maiores quando comparado aos demais elementos, corroborando os resultados do ensaio de lixiviação do resíduo realizado antes de ser adicionado ao concreto, que classificou o material como perigoso de acordo com a NBR 10004 (ABNT, 2004), pelo fato de ter ultrapassado o limite máximo de chumbo, cádmio e selênio no extrato lixiviado e de selênio, cromo, chumbo e arsênio no extrato solubilizado. Porém, como observado na Tabela 28, nenhum dos metais analisados lixiviou além dos limites da EA NEN 7345 (1995).

O pH das amostras coletadas manteve-se entre 8,6 e 12,5. Ledesma et al. (2018) observaram que o aumento do pH em torno de 12 não favorece a imobilização de todos os metais na matriz cimentícia, como por exemplo o chumbo e o molibdênio, enquanto favorece o encapsulamento de outros metais.

Assim, apesar do pó de FEA ser considerado um resíduo perigoso, percebe-se que houve o encapsulamento de todos os metais analisados ao incorporá-lo ao concreto, tornando seu uso viável sob o aspecto ambiental como uma adição.

É importante mencionar que, assim como observado por Schaefer, Rocha e Cheriaf (2007), durante a realização do ensaio para os dois resíduos da pesquisa ocorreu a presença de precipitados nas paredes dos recipientes utilizados que não foram considerados na análise do extrato lixiviado, o que pode ter influenciado nos resultados de lixiviação. Porém, considerando os gradientes de concentração consideravelmente pequenos encontrados para os metais analisados, era esperado que nenhum deles ultrapassasse os limites de norma especificados mesmo com esses precipitados.

4.6 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL

Como parâmetro de controle para a pesquisa, foram analisados os resultados de resistência à compressão axial dos concretos produzidos com os resíduos Terra de Shredder e pó de FEA, obtidos da pesquisa de Págio (2022), que analisou os mesmos concretos desta pesquisa, porém com foco na resistência mecânica do material. A Figura 69 e a Figura 70 mostram os resultados do ensaio de resistência à compressão axial dos concretos produzidos com Terra de Shredder e pó de FEA, respectivamente, bem como os resultados encontrados para os concretos de referência.

Figura 69 – Resultados do ensaio de resistência à compressão axial para as misturas com Terra de Shredder

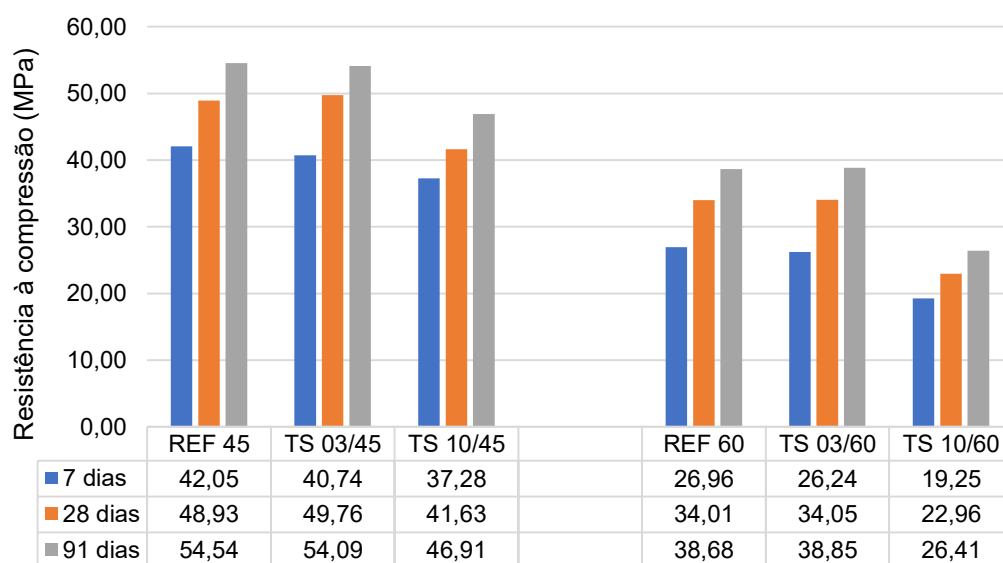
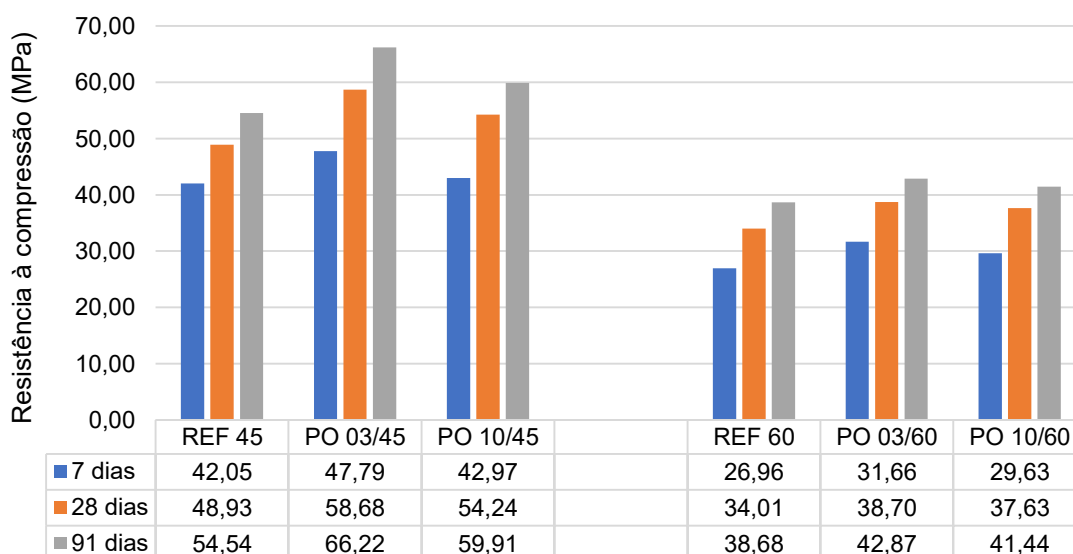


Figura 70 – Resultados do ensaio de resistência à compressão axial para as misturas com Pó de FEA



Fonte: Pagio (2022).

Para os resultados do ensaio nos concretos produzidos com Terra de Shredder (Figura 69), percebe-se que, como esperado, há um aumento das resistências com o aumento da idade de ensaio nas duas relações a/c avaliadas. É possível perceber que houve redução dos valores de resistência à compressão quando o resíduo foi

incorporado, especialmente para a adição de 10%, indicando que a Terra de Shredder não foi benéfica aos concretos produzidos.

Já para os concretos produzidos com adição do resíduo pó de FEA (Figura 70), também ocorreu um aumento esperado da resistência com o passar do tempo e também é possível perceber que os resultados de resistência à compressão axial foram maiores se comparados aos concretos de referência, nas duas relações a/c e todas as idades avaliadas, especialmente as misturas com 3% de adição, indicando que, no período de tempo avaliado, o pó de FEA melhorou a resistência mecânica do concreto.

5 CONCLUSÃO E CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este capítulo apresenta as conclusões e considerações sobre a utilização de resíduos siderúrgicos como adição ao concreto, trazendo uma contribuição quanto à caracterização dos resíduos Terra de Shredder e pó do despoeiramento do forno elétrico a arco (pó de FEA) e as suas utilizações no concreto, através da análise de ensaios no estado fresco e no estado endurecido, avaliando a durabilidade e a lixiviação de contaminantes dos materiais produzidos.

É importante salientar que a pesquisa tinha o objetivo inicial de realizar a análise microestrutural dos concretos produzidos, de modo a entender melhor a interação entre os compostos dos resíduos e os compostos do cimento, através da análise de imagens de microscopia eletrônica varredura (MEV). Porém, devido às restrições geradas pela pandemia de Covid-19 que teve início no ano de 2020 e segue até os dias atuais, gerando restrições no uso de laboratórios internos e externos à universidade, não foi possível concluir esta etapa a tempo.

5.1 CONCLUSÕES SOBRE O RESÍDUO TERRA DE SHREDDER

Com relação à caracterização do resíduo Terra de Shredder para ser aplicado ao concreto, foi necessário mais de uma etapa de beneficiamento para que o material atingisse uma finura semelhante à do cimento, passando primeiramente por um peneiramento, moagem e uma nova etapa de peneiramento, o que dificulta o processo de reaproveitamento do material.

Além disso, o resíduo apresenta uma elevada heterogeneidade, com uma composição química variada e que depende exclusivamente dos materiais que alimentam o triturador Shredder, podendo variar de planta a planta. A perda ao fogo elevada do material, que pode indicar um elevado teor de matéria orgânica devido a presença de terra em sua composição, pode afetar o desempenho dos concretos produzidos com sua incorporação, evidenciando a necessidade de um beneficiamento do resíduo antes de incorporá-lo ao concreto. Apesar disso, o resíduo atingiu uma finura adequada para ser utilizado nos concretos e com isso foi possível a sua utilização para a realização dos ensaios. A morfologia dos grãos do resíduo apresentou-se variada e a caracterização ambiental apontou o material como um resíduo não-

perigoso e não-inerte, sendo necessária a atenção quanto ao seu descarte, pois pode apresentar características química reativas a determinados meios.

No estado fresco, os concretos produzidos com a adição do resíduo apresentaram um aumento elevado da trabalhabilidade naqueles produzidos com a relação a/c 0,60 e um aumento contínuo naqueles produzidos com a relação a/c 0,45, porém todos eles apresentaram um aspecto coeso e homogêneo durante o ensaio, observando um completo envolvimento dos agregados pela pasta.

No estado endurecido, os concretos produzidos com a adição do resíduo reduziram a absorção por capilaridade dos concretos, 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, como o percentual de resíduo não foi significativo, não houve diferença no potencial de corrosão entre os concretos com e sem a adição do resíduo nos diferentes teores utilizados. Já quando se analisou o efeito da relação a/c utilizada, notou-se que os concretos com relação a/c 0,45 foram melhores na proteção à corrosão, sendo 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.

Os resultados do ensaio de lixiviação de contaminantes mostraram que os concretos produzidos não apresentaram lixiviação dos compostos químicos analisados além dos limites, nem mesmo aqueles que solubilizaram no ensaio de caracterização ambiental, indicando a estabilização dos metais presentes no resíduo, de forma que sua incorporação no concreto não apresenta riscos ao meio ambiente e a saúde do usuário.

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 pode dificultar seu uso, principalmente em concretos armados. Assim, recomenda-se a aplicação desse material em concretos não-estruturais, como por exemplo blocos de concreto para pavimentação, como já estudado por outros autores, e com menores relações água/cimento das misturas produzidas.

5.2 CONCLUSÕES SOBRE O RESÍDUO PÓ DE FEA

A caracterização do resíduo pó de FEA mostrou que o material apresenta uma elevada superfície específica e também grande quantidade de partículas finas e de formato esférico, em sua maior parte, não necessitando de um processo de beneficiamento, o que torna o material mais fácil de ser utilizado na construção civil.

Sua composição química é formada predominantemente por ferro e zinco, o que impacta no tempo de endurecimento do concreto, pois o zinco atua junto aos compostos do cimento atrasando a hidratação. Um fator de importância sobre o pó de FEA e que pode dificultar sua utilização como uma adição é que sua composição química pode variar planta a planta, pois depende de alguns fatores como por exemplo a sucata que alimenta o forno elétrico, as condições de funcionamento do forno e os procedimentos utilizados. A caracterização ambiental realizada classificou o resíduo como perigoso devido à presença de metais pesados, gerando uma maior dificuldade de reaproveitamento e descarte do material no ambiente.

No estado fresco, os concretos produzidos com adição de pó de FEA apresentaram aumento da trabalhabilidade, com exceção do teor de 3% na relação a/c 0,45, que diminuiu com relação ao concreto de referência. Todos os traços produzidos apresentaram homogeneidade e coesão da mistura, com o completo envolvimento dos agregados pela pasta. A melhora na trabalhabilidade dos concretos é atribuída ao fato de o resíduo ser um material muito fino e o formato esférico de suas partículas proporcionar um efeito de rolamento na mistura.

No estado endurecido, foi observada a melhora na absorção por capilaridade dos concretos produzidos com adição de pó de FEA com relação aos concretos de referência, sendo que aqueles com adição de 3% tiveram os melhores resultados entre eles, não descartando o uso do teor de 10%, que obteve também 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 mostrou bons resultados 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. Assim, os

concretos com adição de 10% de pó de FEA e relação a/c 0,45 apresentaram menor probabilidade de corrosão, não descartando também o uso do teor de 3% com a relação a/c 0,45. Os resultados deste ensaio foram corroborados pelo ensaio de aspersão do indicador nitrato de prata, que apresentaram os mesmos resultados referentes à altura de penetração de cloretos.

Apesar de ser considerado um resíduo perigoso, os concretos produzidos com a adição de pó de FEA não apresentaram lixiviação de contaminantes além dos limites de norma, o que indicia que ocorreu a estabilização dos compostos perigosos na matriz do concreto, tornando o material produzido seguro do ponto de vista ambiental para ser utilizado na construção civil.

Assim, conclui-se que a utilização do resíduo pó de FEA na produção de concretos traz melhorias às propriedades relacionadas com a durabilidade dos concretos produzidos e, do ponto de vista ambiental, quando se avalia a lixiviação de contaminantes dos concretos produzidos, mostrou também resultados vantajosos. De modo geral, o teor de 10% de adição de resíduo utilizado junto à relação água/cimento de 0,45 apresentou os melhores resultados nos ensaios realizados.

5.3 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

Durante o desenvolvimento do mestrado, devido à situação de pandemia que teve início em 2020, ano no qual seriam iniciados os procedimentos experimentais, alguns ensaios relevantes para a pesquisa não puderam ser realizados devido a diversos fatores, como as restrições do laboratório em virtude do protocolo de segurança contra a COVID-19, tempo disponível para a realização da pesquisa, restrições em laboratórios externos responsáveis por análises de resultados de ensaios, entre outros. Portanto, são apresentadas a seguir sugestões de trabalhos futuros sobre a aplicação dos resíduos Terra de Shredder e pó de FEA em concretos, a fim de agregar mais conhecimento ao assunto, realizar ensaios que não puderam ser feitos nesta pesquisa e dar prosseguimento aos estudos:

- Produzir concretos com outros teores de adição dos resíduos;
- Avaliar a durabilidade dos concretos produzidos frente à ação de íons cloretos por meio do ensaio de penetração de cloretos;
- Avaliar a absorção por capilaridade dos concretos em diferentes idades;

- Avaliar a microestrutura dos concretos produzidos por meio da Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV);
- Realizar ensaio de tempo de pega em pastas produzidas com os resíduos e avaliar a utilização do resíduo pó de FEA como um retardador de pega;
- Estudar a incorporação do resíduo pó de FEA na produção de cimentos de baixo calor de hidratação (BC);
- Associar os resultados dos ensaios realizados com a realização de ensaios mecânicos para verificar a viabilidade de aplicação dos resíduos na produção de concretos.

REFERÊNCIAS

- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5738**: Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro, 2015.
- _____. **NBR 5739**: Concreto – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2018.
- _____. **NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto – Procedimento. Rio de Janeiro, 2014.
- _____. **NBR 7211**: Agregados para concreto – Especificação. Rio de Janeiro, 2019.
- _____. **NBR 7218**: Agregados — Determinação do teor de argila em torrões e materiais friáveis. Rio de Janeiro, 2010.
- _____. **NBR 9833**: Concreto fresco – Determinação da massa específica, do rendimento e do teor de ar pelo método gravimétrico. Rio de Janeiro, 2008.
- _____. **NBR 10004**: Resíduos sólidos – Classificação. Rio de Janeiro, 2004.
- _____. **NBR 10005**: Procedimento para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos. Rio de Janeiro, 2004.
- _____. **NBR 10006**: Procedimento para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos. Rio de Janeiro, 2004.
- _____. **NBR 10007**: Amostragem de resíduos sólidos. Rio de Janeiro, 2004.
- _____. **NBR 11579**: Cimento Portland – Determinação da finura por meio da peneira 75 μm (n° 200) - Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2013.
- _____. **NBR 12127**: Gesso para construção - Determinação das propriedades físicas do pó. Rio de Janeiro. 2017.
- _____. **NBR 12653**: Materiais pozolânicos – Requisitos. Rio de Janeiro, 2015.
- _____. **NBR 15894**: Metacaulim para uso com cimento Portland em concreto, argamassa e pasta. Parte 3: Determinação da finura por meio da peneira 45 μm . Rio de Janeiro, 2010.
- _____. **NBR 16372**: Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da finura pelo método de permeabilidade do ar (método de Blaine). Rio de Janeiro, 2015.
- _____. **NBR 16605**: Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 2017.
- _____. **NBR 16697**: Cimento Portland – Requisitos. Rio de Janeiro, 2017.

_____. **NBR 16889**: Concreto — Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro, 2021.

_____. **NBR 16916**: Agregado miúdo – Determinação da densidade e da absorção de água. Rio de Janeiro, 2020.

_____. **NBR 16917**: Agregado graúdo – Determinação da densidade e da absorção de água. Rio de Janeiro, 2021.

_____. **NBR NM 27**: Agregados – Redução da amostra de campo para ensaios de laboratório. Rio de Janeiro, 2001.

_____. **NBR NM 45**: Agregados – Determinação da massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro, 2006.

_____. **NBR NM 46**: Agregados – Determinação do material fino que passa através da peneira 75 um, por lavagem. Rio de Janeiro, 2003.

_____. **NBR NM 49**: Agregado miúdo – Determinação de impurezas orgânicas. Rio de Janeiro, 2001.

_____. **NBR NM 52**: Agregado miúdo – Determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2009.

_____. **NBR NM 53**: Agregado graúdo – Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro, 2009.

_____. **NBR NM 248**: Agregados – Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003.

AL-NEGHEIMISH, A. I.; AL-MUTLAQ, F. M.; FARES, G.; ALHOZAIMY, A. M.; KHAN, M. I. Characterization of chemical accelerators for sustainable recycling of fresh electric-arc furnace dust in cement pastes. **Advanced Powder Technology**, v. 32, n. 8, p. 3046-3062, 2021.

AL-ZAID, R. Z.; AL-SUGAIR F. H.; AL-NEGHEIMISH, A. I. Investigation of potential uses of electric-arc furnace dust (EAFD) in concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 27, n. 2, p. 267-278, 1997.

APHA - AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION. **Standard Methods for the examination of water and wastewater**. American Public Health Association, American Water Works Association, Water Environmental Federation, 21. ed, Washington, 2005. 937p.

ARAÚJO, J. A. **Reciclagem de pó de Forno Elétrico a Arco para produção de Aglomerado Pré-Fundido (APF) para uso em processo siderúrgico**. 2014. 296 f. Tese (Doutorado em Ciências: Engenharia Hidráulica e Saneamento). Universidade de São Paulo, São Carlos, 2014.

ARCELORMITTAL TUBARÃO. **Geração específica de coprodutos** [mensagem pessoal]. Mensagem recebida por <lilianfavarato@gmail.com> em 15 mai. 2019.

ASTM - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C 876-15: Standard Test Method for Corrosion Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete**. ASTM International: West Conshohocken/ PA, 2015. 8 p.

BAROGHEL-BOUNY, V.; CAPRA, B.; LAURENS, S. A durabilidade das armaduras e do concreto de cobrimento. In: OLLIVIER, J.P.; VICHOT, A., 2014. **Durabilidade do Concreto: Bases Científicas para a formulação de concretos duráveis de acordo com o ambiente**. Tradução: O. Cascudo e H. Carasek. São Paulo: IBRACON, 2014. p. 255-326.

BATISTA, D. C. **Classificação e caracterização dos resíduos do beneficiamento da sucata de ferro e aço utilizada no processo siderúrgico para identificação de viabilidade de aplicações**. 2014. 132 f. Dissertação (Mestrado em Ciências: Engenharia Hidráulica e Saneamento). Universidade de São Paulo, São Carlos, 2014.

BRASIL. **Siderurgia no Brasil 2010-2025**. Centro de Gestão e Estudos Estratégicos (CGEE), Brasília, DF, 2010. 116 p. Disponível em: <https://www.cgEE.org.br/documents/10195/734063/Siderurgia_no_Brasil__9567.pdf/893da7ee-8608-4251-adc1-10c2bf95b009?version=1.0>. Acessado em: 10 out. 2019.

BRASIL. **Decreto nº 7404 de 12 de dezembro de 2010**, Regulamenta a Política Nacional de Resíduos Sólidos. Brasília, DF. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2007-2010/2010/Decreto/D7404.htm>. Acessado em: 22 out. 2019.

BRASIL. **Lei nº 12.305 de 12 de agosto de 2010**, Dispõe sobre a Política Nacional de Resíduos Sólidos. Brasília, DF. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm>. Acessado em: 22 out. 2019.

BRASIL. **Modelagem setorial de opções de baixo carbono para o setor de ferro-gusa e aço**. Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações, ONU Meio Ambiente. Brasília, 2017. 167 p. Disponível em: <http://www.mctic.gov.br/mctic/export/sites/institucional/ciencia/SEPED/clima/arquivos/projeto_opcoes_mitigacao/publicacoes/Ferro-Gusa-e-Aco.pdf>. Acessado em: 17 out. 2019.

BREHM, F. A. **Adição de óxido de zinco (ZnO) em pastas de cimento visando viabilizar a reciclagem de pós de aciaria elétrica (PAE) na construção civil**. 2004. 103 f. Tese (Doutorado em Engenharia). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004.

BUZIN, P. J. W. K.; HECK, N. C.; VILELA, A. C. F. EAF dust: An overview on the influences of physical, chemical and mineral features in its recycling and waste incorporation routes. **Journal of Materials Research and Technology**, v. 6, n. 2, p. 194-202, 2017.

CABRAL, A. E. B. **Avaliação da eficiência de sistemas de reparo no combate à iniciação e à propagação da corrosão do aço induzida por cloretos**. 2000. 187 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2000.

CAETANO, J. A.; SCHALCH, V.; PABLOS, J. M. Characterization and recycling of the fine fraction of automotive shredder residue (ASR) for concrete paving blocks production. **Clean Technologies and Environmental Policy**, v. 22, n. 4, p. 835-847, 2020.

CAETANO, J. A. **Reaproveitamento do resíduo Terra de Shredder através da técnica de solidificação/estabilização em matrizes de cimento Portland para aplicação na construção civil**. 2016. 102 f. Dissertação (Mestrado em Ciências: Engenharia Hidráulica e Saneamento). Universidade de São Paulo, São Carlos, 2016.

CÂMARA, G. G. **Caracterização das frações do resíduo do triturador de sucata de uma siderúrgica**. 2017. 100 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais – Tecnologia Mineral, Ambiental e Metalurgia Extrativa). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2017.

CARVALHO, P. S. L.; MESQUITA, P. P. D.; MELO, L. **Panoramas setoriais: mudanças climáticas**. Rio de Janeiro: Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social, 2016. 71 p. Disponível em: <<https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/handle/1408/7158>>. Acessado em: 10 out. 2019.

CARVALHO, P. S. L.; MESQUITA, P. P. D.; ARAÚJO, E. D. G. **Sustentabilidade da siderurgia brasileira: eficiência energética, emissões e competitividade**. Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social - BNDES Setorial, Rio de Janeiro, n. 41, p. 181-236, 2015.

CASCUDO, O. **O controle da corrosão de armaduras em concreto: inspeção e técnicas eletroquímicas**. São Paulo: PINI, 1997. 237p.

COSSU, R.; LAI, T. Automotive shredder residue (ASR) management: An overview. **Waste Management**, v. 45, p. 143-151, 2015.

CUBUKCUOGLU, B.; OUKI, S. K. Comparison of mechanical and leaching behaviours of pulverised fuel ash/low-grade magnesium oxide-cement blended stabilised/solidified baghouse dust. **European Journal of Environmental and Civil Engineering**, v. 23, n.6, p. 771-788, 2019.

DEGEN, M. K. **Avaliação de desempenho mecânico e de durabilidade em concretos produzidos com resíduo de beneficiamento de rochas ornamentais tratado termicamente (RBROTT)**. 2017. 125 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2017.

DIETRICH, Y. P. **Durabilidade de concretos produzidos com adição de resíduos provenientes de rochas ornamentais frente à ação de íons cloreto**. 2015. 179 f.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2015.

EUROPEAN UNION. **Directive 2008/98/EC of the European parliament and of the council on waste and repealing certain directives**. Off J Eur Union 2008, 312:3–30.

FARES, G.; AL-NEGHEIMISH, A. I.; AL-MUTLAQ, F. M.; ALHOZAIMY, A. M.; KHAN, M. I. Effect of freshly produced electric arc-furnace dust and chloride-free chemical accelerators on concrete performance. **Construction and Building Materials**, v. 274, n. 121832, 2021.

FARES, G.; AL-ZAID, R. Z.; FAUZI, A.; ALHOZAIMY, A. M.; AL-NEGHEIMISH, A. I.; KHAN, M. I. Performance of optimized electric arc furnace dust-based cementitious matrix compared to conventional supplementary cementitious materials. **Construction and Building Materials**, v. 112, p. 210-221, 2016.

FIGUEIREDO, J. D. C. **Aplicação de uma fração do resíduo do Shredder na fabricação de blocos cerâmicos estruturais**. 2016. 82 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Minas, Metalúrgica e Materiais). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.

FIGUEIREDO, E. P.; MEIRA, G. R. **Corrosão das armaduras das estruturas de concreto**. Mérida, México: ALCONPAT Internacional, v. 6, mar 2013. 30p.

GALÁN-ARBOLEDAS, R. J.; DIEGO, J. A.; DONDI, M.; BUENO, S. Energy, environmental and technical assessment for the incorporation of EAF stainless steel slag in ceramic building materials. **Journal of Cleaner Production**, v. 142, p. 1778-1788, 2017.

GURSEL A. P.; MARYMAN H.; OSTERTAG C. A life-cycle approach to environmental, mechanical, and durability properties of “green” concrete mixes with rice husk ash. **Journal of Cleaner Production**, v. 112, p. 823-836, 2016.

GUÉZENNEC, A.; HUBER, J.; PATISSON, F.; SESSIECQ, P.; BIRAT, J.; ABLITZER, D. Dust formation in Electric Arc Furnace: Birth of the particles. **Powder Technology**, v. 157, n. 1-3, p. 2-11, 2005.

HELENE, P. **Corrosão em armaduras para concreto armado**. São Paulo: PINI, 1986. 64 p.

HELENE, P., ANDRADE, T. Concreto de cimento Portland. In: ISAIA, G. C. (Org.). **Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia dos Materiais**. 3. ed. São Paulo: Ibracon, 2017, p. 970-1005. 2017. 2 v.

HELENE, P.; TERZIAN, P. R. **Manual de Dosagem e Controle do Concreto**. São Paulo: PINI, 1992. 350 p.

HUNGER, M.; BROUWERS, H. J. H. Flow analysis of water-powder mixtures: Application to specific surface area and shape factor. **Cement and Concrete Composites**, v. 31, p. 39-59, 2009.

IAB – INSTITUTO AÇO BRASIL. **A indústria do aço no Brasil**. Brasília, 2017. Disponível em <https://bucket-gw-cni-static-cms-si.s3.amazonaws.com/media/filer_public/04/a2/04a2a7ac-4a9f-4505-84a5-f4c54242ead7/aco_brasil.pdf>. Acesso em 03 out. 2019.

IAB – INSTITUTO AÇO BRASIL. **Estatística mensal**. 2021. Disponível em <<https://acobrasil.org.br/site/estatistica-mensal/>>. Acesso em 03 mai. 2021.

IAB – INSTITUTO AÇO BRASIL. **Relatório de Sustentabilidade 2018**. Disponível em <<http://www.acobrasil.org.br/sustentabilidade/>>. Acesso em 03 out. 2019.

IAB – INSTITUTO AÇO BRASIL. **Relatório de Sustentabilidade 2020**. Disponível em <<http://www.acobrasil.org.br/sustentabilidade/>>. Acesso em 18 fev. 2022.

LANZERSTOFER, C. Electric arc furnace (EAF) dust: Application of air classification for improved zinc enrichment in in-plant recycling. **Journal of Cleaner Production**, v. 174, p. 1-6, 2018.

LEDESMA, E. F.; LOZANO-LUNAR, A.; AYUSO, J.; GALVÍN, A.P.; FERNANDÉZ; J. M.; JIMÉNEZ, J. R. The role of pH on leaching of heavy metals and chlorides from electric arc furnace dust in cement-based mortars. **Construction and Building Materials**, v.183, p. 365-375, 2018.

MACHADO, J. G. M. S.; BREHM, F. A.; MORAES, C. A. M.; SANTOS, C. A.; VILELA, A. C. F.; CUNHA, J. B. M. Chemical, physical, structural and morphological characterization of the electric arc furnace dust. **Journal of Hazardous Materials**, v. 136, n. 3, p. 953-960, 2006.

MAGALHÃES, M. S.; FALESCHINI, F.; PELLEGRINO, C.; BRUNELLI, K. Cementing efficiency of electric arc furnace dust in mortars. **Construction and Building Materials**, v. 157, p. 141-150, 2017.

MAGALHÃES, M. S.; FALESCHINI, F.; PELLEGRINO, C.; BRUNELLI, K. Influence of alkali addition on the setting and mechanical behavior of cement pastes and mortars with electric arc furnace dust. **Construction and Building Materials**, v. 214, p. 413-419, 2019.

MALACARNE, C. S. **Desenvolvimento e caracterização de cimentos LC³ - cimentos ternários a base de argila calcinada e calcário – a partir de matérias-primas do Rio Grande do Sul**. 2019. 152 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2019.

MANCINI, G.; VIOTTI, P.; LUCIANO, A.; FINO, D. On the ASR and ASR thermal residues characterization of full-scale treatment plant. **Waste Management**, v. 34, n. 2, p. 448-457, 2014.

MANTOVANI, F.; KULAKOWSKI, M. P.; MORAES, C. A. M. Viabilidade do uso de pó de aciaria para pigmentação de concreto. In: **45º Seminário de Aciaria – Internacional**, p. 255-262, Porto Alegre, RS, Brasil, 2014.

MARCONI, M. A.; LAKATOS, E. M. **Fundamentos da Metodologia Científica**. 5 ed. São Paulo: Atlas S.A., 2003. 310 p.

MASLEHUDDIN, M.; AWAN, F. R.; SHAMEEM, M.; IBRAHIM, M.; ALI, M. R. Effect of electric arc furnace dust on the properties of OPC and blended cement concretes. **Construction and Building Materials**, v. 25, p. 308-312, 2011.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais**. São Paulo: Ibracon, 2008. 674 p.

MEIRA, G. R. **Corrosão de Armaduras em Estruturas de Concreto: fundamentos, diagnóstico e prevenção**. João Pessoa: IFPB, 2017.

MEIRA, R. M.; FERREIRA, P. R. R. Revisão sobre ensaios acelerados para indução da corrosão desencadeada por cloretos em concreto armado. **Ambiente Construído**, v. 19, n. 4, p. 223-248, 2019.

METZ, J. C. **Avaliação do uso combinado de pó de aciaria elétrica (PAE) com resíduo do forno de cal (RFC) na hidratação de pastas de cimento**. 2016. 126 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo, 2016.

NEVILLE, A. M.; BROOKS, J. J. **Tecnologia do concreto**. 2 ed. Porto Alegre: Bookman, 2010.

NT BUILD 492, Concrete, mortar and cement-based repair materials: chloride migration coefficient from non-steady-state migration experiments, **Nordtest method**, 1999.

NIDHEESH, P. V.; SURESH KUMAR, M. An overview of environmental sustainability in cement and steel production. **Journal of Cleaner Production**, v. 231, p. 856-871, 2019.

NNI - Netherlands Normalisation Institute Standart. **EA NEN 7345:1995**: Leaching characteristics of solid earthy and stony building and waste materials - Leaching tests - Determination of the leaching of inorganic components from buildings and monolithic waste materials with the diffusion test. Environmental Agency, Netherlands Normalisation Institute Standart, 1995.

NNI - Netherlands Normalisation Institute Standart. **EA NEN 7375:2004**: Leaching Characteristics of Moulded or Monolithic Building and Waste Materials Determination of Leaching of Inorganic Components with the Diffusion Test. Environmental Agency, Netherlands Normalisation Institute Standart, 2004.

NONAT, A. A hidratação dos cimentos. In: CASCUDO, O.; CARASEK, H. **Durabilidade do concreto: bases científicas para formulação de concretos duráveis de acordo com o ambiente**. 1ª ed., p. 17-40, São Paulo, IBRACON, 2014.

OLIVEIRA, J. P.; MACIEL, E. F.; BREHM, F.; KULAKOWSKI, M. P. Estabilização por solidificação de Cromo em concreto por lixiviação: Comparação do método NEN 7345 com método de imersão UNISINOS/INOVATEC adaptado. In: Encontro Nacional sobre Aproveitamento de Resíduos da Construção Civil (ENARC), 2015, São Paulo. **Anais...** São Paulo, São Paulo, p. 1-12.

PÁGIO, M. Z. **Avaliação das propriedades no estado fresco, endurecido e caracterização ambiental de concretos com incorporação de resíduos de pó de FEA e Terra de Shredder**. 2022. 175 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2022.

PALANKAR, N.; RAVI SHANKAR, A. U.; MITHUN, B. M. Durability studies on eco-friendly concrete mixes incorporating steel slag as coarse aggregates. **Journal of Cleaner Production**, v. 129, p. 437-488, 2016.

PÉRA, J.; AMBROISE, J.; CHABANNET, M. Valorization of automotive shredder residue in building materials. **Cement and Concrete Research**, v. 34, p. 557-562, 2004.

RIBEIRO, D. V.; SALES, A.; SOUZA, C. A. C.; ALMEIDA, F. C. R.; CUNHA, M. P.; LOURENÇO, M. Z.; HELENE, P. **Corrosão em estruturas de concreto armado: Teoria, controle e métodos de análise**. 1 ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2014. 272 p.

RINCÓN, O. T.; PÉREZ, O.; PAREDES, E.; CALDERA, Y.; URDANETA, C.; SANDOVAL, I. Long-term performance of ZnO as a rebar corrosion inhibitor. **Cement and Concrete Composites**, v. 24, n. 1, p. 79-87, 2002.

ROSENTINO JÚNIOR, A. J. P. **Uma contribuição para análise do fenômeno das flutuações de tensão nos sistemas elétricos de potência**. 2014. 157 f. Tese (Doutorado em Ciências. Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2014.

ROSSETTI, V. A.; DI PALMA, L.; MEDICI, F. Production of aggregate from non-metallic automotive shredder residues. **Journal of Hazardous Materials**, v. 137, n. 2, p. 1089-1095, 2006.

RUBIO-CINTAS, M. D.; BARNETT, S. J.; PEREZ-GARCÍA, F.; PARRON-RUBIO, M. E. Mechanical-strength characteristics of concrete made with stainless steel industry wastes as binders. **Construction and Building Materials**, v. 204, p. 675-683.

SCHAEFER, C. O.; ROCHA, J. C.; CHERIAF, M. Estudo do comportamento de lixiviação de argamassas produzidas com agregados reciclados. **Exacta**, v. 5, n. 2, p. 243-252, 2007.

SHI, X.; XIE, N.; FORTUNE, K.; GONG, J. Durability of steel reinforced concrete in chloride environments: An overview. **Construction and Building Materials**, v. 30, p. 125-138, 2012.

SILVA, J. G. **Análise do ciclo de vida de tijolos prensados de escória de alto-forno**. 2005. 260 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2005.

SILVA, M. A. R. **Solidificação e estabilização de resíduos inorgânicos industriais: estudo da eficiência do processo e evidência de mecanismos de imobilização**. 2007. 107 f. Tese (Doutorado em Química). Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2007.

SILVA, M. G.; BATTAGIN, A. F.; GOMES, V. **Cimentos Portland com Adições Minerai**s. In: ISAIA, G. C. *Materiais de construção civil*. 3 ed. São Paulo: Ibracon, 2017. p 791-823.

SILVA, N. G. **Avaliação técnica e ambiental da incorporação de pó de aciaria elétrica (PAE) em material cerâmico**. 2018. 176 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo, 2018.

SIMONYAN, L. M.; ALPATOVA, A. A.; DEMIDOVA, N. V. The EAF dust chemical and phase composition research techniques. **Journal of Cleaner Production and Technology**, v. 8, n. 2, 2019.

SIVIERO, A. F. T.; GALUPPO, M. V.; MARCELLINO, M. M. A.; MAGALHÃES, D. C.; PEREIRA, L. G.; GUIMARÃES, D. Caracterização do resíduo sólido gerado na planta de beneficiamento de sucata utilizada na produção de aço. In: 72nd ABM ANNUAL CONGRESS, 2017, São Paulo. **Anais eletrônicos**... Disponível em: <<https://abmproceedings.com.br/ptbr/article/caracterizacao-do-residuo-solido-gerado-na-planta-de-beneficiamento-de-sucata-utilizada-na-producao-de-aco>>. Acesso em: 27 fev. 2020.

SOFILIC, T.; RASTOVCAN-MIOC, A.; CERJAN-STEFANOVIC, S.; NOVOSEL-RADOVIC, V.; JENKO, M. Characterization of steel mill electric-arc furnace dust. **Journal of Hazardous Materials**, v. 109, p. 59-70, 2004.

SOUZA, C. A. C.; MACHADO, A. T.; LIMA, L. R. P. A.; CARDOSO, R. J. C. Stabilization of electric-arc furnace dust in concrete. **Materials Research**, v. 13, n. 4, p. 513-519, 2010.

STATHOPOULOS, V. N.; PAPANDREOU, A.; KANELLOPOULOU, D.; STOURNARAS, C. J. Structural ceramics containing electric arc furnace dust. **Journal of Hazardous Materials**, v. 262, p. 91-99, 2013.

TEIXEIRA, R. A. Concretos produzidos com adição de resíduo proveniente do sistema de dessulfurização de gases (FGD): avaliação de aspectos mecânicos, ambientais e de durabilidade. 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2019.

TELLES, V. B. **Reciclagem da poeira de aciaria elétrica na sinterização de minério de ferro visando a eliminação de zinco**. 2010. 104 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia). Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.

UNI - Unificazione Nazionale Italiana. **UNI 7928**: Determinazione della penetrabilità dello ione cloruro. Italian Standart, 1970.

VARGAS, A. S.; MASUERO, A. B.; VILELA, A. C. F. Estudo microestrutural e determinação do calor de hidratação em pastas de cimento Portland com pó de aciaria elétrica (PAE). **Ambiente Construído**, v. 4, n. 2, p. 7-18, 2004.

VARGAS, A. S.; MASUERO, A. B.; VILELA, A. C. F. Investigations on the use of electric-arc furnace dust (EAFD) in Pozzolan-modified Portland cement I (MP) pastes. **Cement and Concrete Research**, v. 36, p. 1833-1841, 2006.

VENÂNCIO, C.; ROCHA, J. C.; CHERIAF, M. Avaliação do potencial de lixiviação do metal pesado Cd^{2+} em argamassas de cimento Portland. In: Encontro Latinoamericano de Edificações e Comunidades Sustentáveis, 2013, Curitiba. **Anais...** Curitiba, Paraná, p.1-8.

VERMEULEN, I.; VAN CANEGHEM, J.; BLOCK, C.; BAEYENS, J.; VANDECASTEELE, C. Automotive shredder residue (ASR): Reviewing its production from end-of-life vehicles (ELVs) and its recycling, energy or chemicals' valorisation. **Journal of Hazardous Materials**, v. 190, p. 8-27, 2011.

VIANA, F. L. **Caderno Setorial ETENE: Indústria Siderúrgica**. Banco do Nordeste, ano 2, n. 13, 2017. Disponível em: <<https://www.bnb.gov.br/publicacoes/CADERNO-SETORIAL>>. Acessado em: 07 out. 2019.