



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

MARIANA ZANI PAGIO

**AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES NO ESTADO FRESCO, ENDURECIDO E
CARACTERIZAÇÃO AMBIENTAL DE CONCRETOS COM A INCORPORAÇÃO
DE RESÍDUOS DE PÓ DE FEA E TERRA DE SHREDDER**

Vitória

2022

MARIANA ZANI PAGIO

**AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES NO ESTADO FRESCO, ENDURECIDO E
CARACTERIZAÇÃO AMBIENTAL DE CONCRETOS COM A INCORPORAÇÃO
DE RESÍDUOS DE PÓ DE FEA E TERRA DE SHREDDER**

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

P136a Pagio, Mariana Zani, 1992-
AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES NO ESTADO FRESCO, ENDURECIDO E CARACTERIZAÇÃO AMBIENTAL DE CONCRETOS COM A INCORPORAÇÃO DE RESÍDUOS DE PÓ DE FEA E TERRA DE SHREDDER / Mariana Zani Pagio. - 2022.
165 f. : il.

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

1. Concreto. 2. Sustentabilidade. 3. Siderurgia. 4. Redução de resíduos. I. Vieira, Geilma Lima. II. Universidade Federal do Espírito Santo. Centro Tecnológico. III. Título.

CDU: 624

MARIANA ZANI PAGIO

**AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES NO ESTADO FRESCO, ENDURECIDO E
CARACTERIZAÇÃO AMBIENTAL DE CONCRETOS COM A INCORPORAÇÃO
DE RESÍDUOS DE PÓ DE FEA E TERRA DE SHREDDER**

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

Aprovada em 27 de abril de 2022.

BANCA EXAMINADORA

Profª Dra. Geilma Lima Vieira
Universidade Federal do Espírito Santo
Orientadora

Profª Dra. Maristela Gomes da Silva
Universidade Federal do Espírito Santo
Membro Interno - UFES

Profª Dra. Ana Paula Kirchheim
Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Membro Externo - UFRGS

“Não somos convidados a uma vida fácil, mas a uma vida entregue e corajosa.”

Samia Marsili

AGRADECIMENTOS

Em todos os momentos da minha vida, nas alegrias e nas dificuldades, eu me submeto inteiramente às vontades de Deus. Na escolha de fazer o mestrado não foi diferente: a minha vontade existia, mas esse desafio teria que ser um plano Dele para minha vida também. E foi.

Por isso meu primeiro agradecimento é a Ele. Obrigada, Deus, por me guiar e me abençoar em todas as etapas deste mestrado. Obrigada por me conduzir e direcionar meu caminho de modo que eu conseguisse chegar até aqui. Como em tudo na minha vida, eu não conseguiria sem a intervenção Divina.

Aos meus pais, José Luiz Pagio e Ledimir Zani Pagio que sempre estiveram presentes na minha vida, me provendo de tudo que fosse necessário para que eu seguisse firme no caminhar da vida, me incentivando e apoiando a cada decisão tomada.

A minha família, que nunca teve dúvida da minha competência para vencer esta etapa e nunca mediu esforços em me apoiar e confiar na minha capacidade.

A minha professora orientadora Geilma Lima Vieira pela oportunidade, generosidade, amizade e ensinamentos ao longo do mestrado. Você certamente foi mais que uma orientadora e sem sua condução a pesquisa não seria possível.

À Lilian, que, de um convite despretenso para fazer o processo seletivo, se tornou não só aluna do mestrado igual a mim, mas também minha dupla, minha parceira de dificuldades e realizações ao longo destes 3 anos. Esse mestrado nos deixou ainda mais próximas e eu sou muito grata a isso!

Aos professores do Departamento de Engenharia Civil por ministrar as disciplinas e promover tanto conhecimento aos alunos em sala de aula e no laboratório.

Ao LEMAC e todos os funcionários ali presentes que sempre se mostraram dispostos em nos ajudar com os ensaios e com a produção de mais de 300 corpos de prova.

À CAPES, pelo apoio financeiro durante a pesquisa que certamente foi essencial para que eu conseguisse cumpri-la.

À ArcelorMittal, pelo fornecimento dos coprodutos e pela disponibilidade em ajudar o desenvolvimento da pesquisa.

À Mizu e à Concrevit pelos materiais cedidos.

Ao Ifes e Ufes, por disponibilizar os laboratórios para realização de análises microestruturais.

Ao LABGEOPAV que, por meio dos professores e técnicos, sempre esteve disposto em contribuir para a realização das atividades e dos ensaios disponibilizando espaço físico e equipamentos.

Ao CETEM, por se dispor em realizar os ensaios de granulometria a laser, DRX e FRX nos resíduos, contribuindo de maneira significativa nas análises aqui realizadas.

Ao LABPETRO, pela realização dos ensaios ambientais.

À Ufes, por toda estrutura disponibilizada.

Aos amigos do mestrado, Lilian, Rodolpho, Lara, Dalmon, Matheus, Anna Luiza e Tiago que tornavam os dias mais leves e divertidos.

Por fim, a todos que ajudaram de forma direta ou indireta na realização da pesquisa e alcance deste sonho.

RESUMO

PAGIO, Mariana Zani. **Avaliação das propriedades no estado fresco, endurecido e caracterização ambiental de concretos com a incorporação de resíduos de Pó de FEA e Terra de Shredder.** 2022. 165f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2022.

Com o crescimento acelerado do setor da construção civil em busca do desenvolvimento da infraestrutura, a geração de resíduos e o desperdício de materiais têm sido grandes problemas em nível mundial, fazendo da sustentabilidade um desafio a ser alcançado. O setor siderúrgico se destaca pela grande geração de resíduos sólidos provenientes do processo de produção do aço e apresenta potencial de estudo acerca da viabilidade destes resíduos em matrizes cimentícias, potencializando seu uso em detrimento à exploração de matérias-primas. Esta dissertação tem como objetivo a avaliação da influência da adição da Terra de Shredder e do Pó do despoejamento do forno elétrico a arco em teores de 3% e 10% em relação à massa do cimento, nas propriedades do estado fresco (massa específica, teor de ar aprisionado e abatimento de tronco de cone) e endurecido (resistência à compressão e à tração, módulo de elasticidade dinâmico e ensaio de lixiviação) do concreto. Os resultados avaliados indicam que, em relação às propriedades no estado fresco, os dois resíduos apresentaram comportamentos semelhantes conforme se deu a adição: houve aumento da trabalhabilidade, decréscimo dos valores de massa específica e aumento do teor de ar aprisionado. Na avaliação das propriedades mecânicas há um comportamento diferente entre os resíduos: enquanto os concretos com o pó de FEA apresentam ganho de desempenho com a sua adição, nos três ensaios realizados (especialmente o teor de 3%, com o melhor desempenho das misturas produzidas), os concretos com a terra de Shredder apresentam perda de desempenho ao passo em que ocorre incorporação do resíduo, também para os três ensaios avaliados, sendo que a adição de 10% foi a que apresentou os resultados mais baixos. Por fim, na análise ambiental todas as misturas produzidas não apresentaram restrição ao uso, se apresentando seguras do ponto de vista ambiental.

Palavras-chave: concreto; resíduo siderúrgico; propriedades mecânicas.

ABSTRACT

PAGIO, Mariana Zani. **Evaluation of properties in the fresh, hardened state and environmental characterization of concretes with the incorporation of FEA dust and Shredder residues.** 2022. 165f. Dissertation (Master's Degree in Civil Engineering) – Graduate Program in Civil Engineering, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2022.

With the accelerated growth of the civil construction sector in search of infrastructure development, the generation of waste and the waste of materials have been major problems worldwide, making sustainability a challenge to be achieved. The steel industry stands out for the large generation of solid waste from the steel production process and has the potential to study the feasibility of these wastes in cementitious matrices, enhancing its use in detriment to the exploitation of raw materials. This dissertation aims to evaluate the influence of the addition of Shredder Soil and Dust from electric arc furnace dedusting at 3% and 10% in relation to the mass of cement, in the fresh state properties (density mass, trapped air content and slump) and hardened (compressive and tensile strength, dynamic modulus of elasticity and leaching test) of concrete. The evaluated results indicate that, in relation to the properties in the fresh state, the two wastes presented similar behaviors according to the addition: there was an increase in workability, decrease in the values of specific mass and increase in the content of trapped air. In the evaluation of the mechanical properties there is a different behavior between the wastes: while the concretes with the EAF powder present performance gains with its addition, in the three tests performed (especially the 3% content, with the best performance of the mixtures produced), the concretes with the Shredder soil present performance loss as the incorporation of the waste occurs, also for the three tests evaluated, and the addition of 10% was the one that presented the lowest results. Finally, in the environmental analysis, all the produced mixtures showed no restriction to use, presenting safe from the environmental point of view.

Key words: concrete; steel waste; mechanical properties.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Distribuição da produção de aço mundial	20
Figura 2 - Fluxo simplificado de produção do aço.	26
Figura 3 - Esquema do mecanismo de formação do Pó de FEA.....	30
Figura 4 - Curva do calor de hidratação das pastas avaliadas.....	36
Figura 5 - MEV das pastas de 7 dias com adição de 15% de resíduo e ampliação de 2000x (a) e 25% de resíduo com ampliação de 375x (b)	37
Figura 6 - Resistência à compressão das argamassas avaliadas	38
Figura 7 - Velocidade de pulso ultrassônico das argamassas avaliadas.	39
Figura 8 - Resultados de resistência à compressão (a) e à tração (b) dos concretos produzidos.....	40
Figura 9 - Microscopia eletrônica de varredura das partículas do Pó de FEA, com aumento de 7500x.....	42
Figura 10 - Fluxograma de etapas da abordagem metodológica.	47
Figura 11 – Recebimento dos resíduos no laboratório (a) e homogeneização e quarteamento (b).....	48
Figura 12 - Programa experimental.....	50
Figura 13 - Esquema de nomenclatura das misturas.	53
Figura 14 - Moinho de Bolas (a) e as esferas utilizadas (b).	57
Figura 15 - Resíduos antes e depois do processo de beneficiamento. (a) Pó de FEA e (b) Terra de Shredder.....	58
Figura 16 - Organograma da caracterização dos resíduos siderúrgicos.	59
Figura 17 - Equipamento utilizado no ensaio de potencial hidrogeniônico.....	61
Figura 18 - Microscópio eletrônico de varredura (a) e metalizador utilizado (b).....	62
Figura 19 - Corpos-de-prova depois de moldados e retirados da cura	64
Figura 20 - Diagrama de dosagem da pesquisa.....	65
Figura 24 - Execução do ensaio de resistência à compressão	67
Figura 25 - Execução do ensaio de resistência à tração por compressão diametral.....	68
Figura 23 - Equipamento utilizado para obtenção da velocidade de propagação ultrassônica e posição dos transdutores.	70
Figura 24 - Dimensões do corpo de prova para ensaio de lixiviação (a) e corpos de prova serrados para iniciar o ensaio (b)	73

Figura 25 – Realização do ensaio de tanque	74
Figura 26 - Distribuição granulométrica do pó de FEA e do CP V - ARI	77
Figura 27 - Resultado da Difração de Raios-X do Pó de FEA.....	82
Figura 28 - Microscopia eletrônica de varredura do Pó de FEA.....	84
Figura 29 - Microscopia eletrônica de varredura, com pontos de EDS, do pó de FEA.	85
Figura 30 - Distribuição granulométrica da terra de Shredder e do CP V - ARI	88
Figura 31 - Resultado da Difração de Raios-X da Terra de Shredder.....	92
Figura 32 - Microscopia eletrônica de varredura da Terra de Shredder.	94
Figura 33 - Microscopia eletrônica de varredura, com pontos de EDS, da Terra de Shredder.....	95
Figura 34 - Resultados do ensaio de abatimento de tronco de cone para as misturas com Pó de FEA	98
Figura 35 - Abatimentos dos concretos de referência e com a adição de Pó de FEA	98
Figura 36 - Resultados do ensaio de massa específica e teor de ar aprisionado para as misturas com Pó de FEA.....	102
Figura 37 - Resultados do ensaio de resistência à compressão axial para as misturas com Pó de FEA.	103
Figura 38 - Gráfico do efeito isolado da variação da idade sobre a média dos resultados de resistência à compressão dos concretos com pó de FEA	104
Figura 39 -Gráfico do efeito isolado da variação da relação a/c sobre a média dos resultados de resistência à compressão dos concretos com pó de FEA	104
Figura 40 - Gráfico do efeito isolado da variação do percentual de adição de resíduo sobre a média dos resultados de resistência à compressão dos concretos com pó de FEA	105
Figura 41 – Gráfico do efeito da interação entre o percentual de adição de resíduo e a idade sobre a média dos resultados de resistência à compressão dos concretos com pó de FEA	106
Figura 42 - Gráfico do efeito da interação entre a idade e a relação a/c sobre a média dos resultados de resistência à compressão dos concretos com pó de FEA.....	108
Figura 43 - Gráfico do efeito da interação entre o percentual de resíduo e a relação a/c sobre a média dos resultados de resistência à compressão dos concretos com pó de FEA.	108

Figura 44 - Gráfico do efeito da interação entre o percentual de resíduo, a relação a/c e a idade sobre a média dos resultados de resistência à compressão dos concretos com pó de FEA.....	109
Figura 45 - Resultados do ensaio de resistência à tração por compressão diametral para as misturas com Pó de FEA.....	111
Figura 46 - Gráfico do efeito isolado da variação da idade sobre a média dos resultados de resistência à tração dos concretos com pó de FEA.....	112
Figura 47 - Gráfico do efeito isolado da variação da relação a/c sobre a média dos resultados de resistência à tração dos concretos com pó de FEA.....	113
Figura 48 - Gráfico do efeito isolado da variação do percentual de resíduo sobre a média dos resultados de resistência à tração dos concretos com pó de FEA.....	114
Figura 49 - Resultados do ensaio de módulo de elasticidade dinâmico para as misturas com Pó de FEA.	116
Figura 50 - Gráfico do efeito isolado da variação da idade sobre a média dos resultados de módulo de elasticidade dinâmico dos concretos com pó de FEA.....	117
Figura 51 - Gráfico do efeito isolado da variação da relação a/c sobre a média dos resultados de módulo de elasticidade dinâmico dos concretos com pó de FEA.....	118
Figura 52 - Gráfico do efeito isolado da variação do percentual de resíduo sobre a média dos resultados de módulo de elasticidade dinâmico dos concretos com pó de FEA.....	119
Figura 53 - Gráfico do efeito da interação entre o percentual de resíduo e a idade sobre a média dos resultados de módulo de elasticidade dinâmico dos concretos com pó de FEA.....	120
Figura 54 - Gráfico do efeito da interação entre o percentual de resíduo e a relação a/c sobre a média dos resultados de módulo de elasticidade dinâmico dos concretos com pó de FEA.....	121
Figura 55 - Gráfico do efeito da interação entre o percentual de resíduo, a relação a/c e a idade sobre a média dos resultados de módulo de elasticidade dinâmico dos concretos com pó de FEA.....	122
Figura 56 - Resultados do ensaio de velocidade de propagação de ondas ultrassônicas para as misturas com Pó de FEA.....	123
Figura 57 - Resultados do ensaio de abatimento de tronco de cone para as misturas com a Terra de Shredder.....	126

Figura 58 - Abatimentos dos concretos de referência e com a adição de Terra de Shredder.....	126
Figura 59 - Resultados do ensaio de massa específica e teor de ar aprisionado para as misturas com Terra de Shredder.	128
Figura 60 - Resultados do ensaio de resistência à compressão axial para as misturas com a Terra de Shredder.	129
Figura 61 - Gráfico do efeito isolado da variação da idade sobre a média dos resultados de resistência à compressão dos concretos com Terra de Shredder. ...	130
Figura 62 - Gráfico do efeito isolado da variação da relação a/c sobre a média dos resultados de resistência à compressão dos concretos com Terra de Shredder. ...	131
Figura 63 - Gráfico do efeito isolado da variação do percentual de resíduo sobre a média dos resultados de resistência à compressão dos concretos com Terra de Shredder.....	132
Figura 64 - Gráfico do efeito da interação entre o percentual de resíduo e a idade sobre a média dos resultados de resistência à compressão dos concretos com Terra de Shredder.....	133
Figura 65 - Objetos encontrados no resíduo antes de passar pelo processo de peneiramento na malha de 4,8 mm.....	134
Figura 66 - Gráfico do efeito da interação entre o percentual de resíduo e a relação a/c sobre a média dos resultados de resistência à compressão dos concretos com Terra de Shredder.	135
Figura 67 - Resultados do ensaio de resistência à tração para as misturas com Terra de Shredder.....	136
Figura 68 - Gráfico do efeito isolado da variação da idade sobre a média dos resultados de resistência à tração dos concretos com Terra de Shredder.....	137
Figura 69 - Gráfico do efeito isolado da variação da relação a/c sobre a média dos resultados de resistência à tração dos concretos com Terra de Shredder.....	138
Figura 70 - Gráfico do efeito isolado da variação do percentual de resíduo sobre a média dos resultados de resistência à tração dos concretos com Terra de Shredder.	139
Figura 71 - Gráfico do efeito da interação entre a relação a/c e o percentual de resíduo sobre a média dos resultados de resistência à tração dos concretos com Terra de Shredder.....	140

Figura 72 - Gráfico do efeito da interação entre o percentual de resíduo, a relação a/c e a idade sobre a média dos resultados de resistência à tração dos concretos com Terra de Shredder.	141
Figura 73 - Resultados do ensaio de módulo de elasticidade dinâmico para as misturas com Terra de Shredder.	142
Figura 74 - Gráfico do efeito isolado da variação da idade sobre a média dos resultados de módulo de elasticidade dinâmico dos concretos com Terra de Shredder.	143
Figura 75 - Gráfico do efeito isolado da variação da relação a/c sobre a média dos resultados de módulo de elasticidade dinâmico dos concretos com Terra de Shredder.	143
Figura 76 - Gráfico do efeito isolado da variação do percentual de resíduo sobre a média dos resultados de módulo de elasticidade dinâmico dos concretos com Terra de Shredder.....	144
Figura 77 - Gráfico do efeito da interação entre o percentual de resíduo e a idade sobre a média dos resultados de módulo de elasticidade dinâmico dos concretos com Terra de Shredder.....	145
Figura 78 - Gráfico do efeito da interação entre o percentual de resíduo e a relação a/c sobre a média dos resultados de módulo de elasticidade dinâmico dos concretos com Terra de Shredder.	146
Figura 79 - Resultados do ensaio de velocidade de propagação de onda ultrassônica para as misturas com Terra de Shredder.....	147

LISTA DE QUADROS

Quadro 1- Variáveis utilizadas na pesquisa	49
Quadro 2 - Matriz experimental do Pó de FEA e da Terra de Shredder.....	52
Quadro 3 - Sigla das misturas desenvolvidas na pesquisa.	54
Quadro 4 - Beneficiamento realizado em cada resíduo	58
Quadro 5 - Ordem de atividades para ensaio de módulo de elasticidade e ensaios mecânicos	72

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Projeção da produção de aço no Brasil por rota.	21
Tabela 2 - Composição, em porcentagem de massa, da fração pesada do resíduo da Shredder.....	28
Tabela 3 - Composição média do pó do despoeiramento do forno elétrico a arco (em porcentagem).	31
Tabela 4 - Quantidade de resíduo gerado, reciclado e descartado em aterro e porcentagem de zinco em relação à produção mundial (dados de 2013).	32
Tabela 5 - Caracterização do CP V – ARI.....	55
Tabela 6 - Caracterização do agregado miúdo.	56
Tabela 7 - Caracterização do agregado graúdo.....	56
Tabela 8 - Métodos utilizados para realização da caracterização dos resíduos.....	59
Tabela 9 - Determinação dos traços para elaboração do diagrama de dosagem	64
Tabela 10 - Traços unitários das misturas.	65
Tabela 11 - Padrões cumulativos de U1 e U2 requeridos pela NEN 7345 (NNI, 1995)	75
Tabela 12 - Resultados de caracterização física do pó de FEA e do CP V – ARI.....	76
Tabela 13 - Índices físicos do pó de FEA encontrados em outras pesquisas	78
Tabela 14 – Resultados de caracterização química do Pó de FEA.....	79
Tabela 15 - Conteúdo de Ferro e Zinco, perda ao fogo e pH encontrados em outras pesquisas.	80
Tabela 16 - Composição química dos pontos identificados	86
Tabela 17 - Resultado da análise do extrato lixiviado e solubilizado do Pó de FEA .	87
Tabela 18 - Resultados de caracterização física da terra de Shredder e do CP V – ARI.	88
Tabela 19 - Resultados de caracterização química da Terra de Shredder.	90
Tabela 20 - Conteúdo de Ferro e Sílica, perda ao fogo e pH encontrados em outras pesquisas.	90
Tabela 21 - Compostos cristalinos identificados por DRX nas frações < 2,00 mm ...	92
Tabela 22 - Composição química dos pontos identificados	95
Tabela 23 - Resultado da análise do extrato lixiviado e solubilizado da Terra de Shredder.....	96

Tabela 24 - Composição da fração de cimento dos concretos estudados	100
Tabela 25 - Classificação dos concretos de acordo com a NBR 893 (ABNT, 2015)	101
Tabela 26 - Análise de variância da resistência à compressão dos concretos com pó de FEA	103
Tabela 27 - Análise de variância da resistência à tração dos concretos com pó de FEA	112
Tabela 28 - Análise de variância do módulo de elasticidade dos concretos com pó de FEA.	116
Tabela 29 - Correlação entre velocidade de onda ultra-sônica e a qualidade do concreto	123
Tabela 30 - Lixiviação acumulada nos concretos produzidos com adição de Pó de FEA (mg/m ²).....	124
Tabela 31 - Classificação dos concretos de acordo com a NBR 893 (ABNT, 2015)	127
Tabela 32 - Análise de variância da resistência à compressão dos concretos com Terra de Shredder.....	130
Tabela 33 - Análise de variância da resistência à tração dos concretos com Terra de Shredder.....	136
Tabela 34 - Análise de variância do módulo de elasticidade dos concretos com Terra de Shredder.....	142
Tabela 35 - Correlação entre velocidade de onda ultra-sônica e a qualidade do concreto	147
Tabela 36 - Lixiviação acumulada nos concretos produzidos com adição de Terra de Shredder (mg/m ²)	148

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

CP's – Corpos de prova

CP V – ARI – Cimento Portland de alta resistência inicial

C-S-H – Silicato de cálcio hidratado

C-Z-H – Hidrozincato de Cálcio

Ca(OH)₂ – Hidróxido de cálcio

DRX – Difractometria de raios-X

EDS – Espectroscopia por energia dispersiva

FEA – Forno elétrico a arco

IAB – Instituto aço Brasil

IPT/EPUSP – Instituto de pesquisa tecnológica/Escola Politécnica da Universidade de São Paulo

LEMAC – Laboratório de ensaios e materiais de construção civil

MEV – Microscopia eletrônica de varredura

UFES – Universidade Federal do Espírito Santo

IFES – Instituto Federal do Espírito Santo

RAA - Reação álcali-agregado

WSA – World Steel Association

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	19
1.1	OBJETIVOS	22
1.1.1	Geral	22
1.1.2	Específicos	23
1.2	ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO.....	23
2	O SETOR SIDERÚRGICO BRASILEIRO E A APLICAÇÃO DOS RESÍDUOS GERADOS	25
2.1	GERAÇÃO DOS RESÍDUOS E SUA COMPOSIÇÃO NAS USINAS SEMI-INTEGRADAS E NO PREPARO DE CARGA.....	27
2.1.1	Terra de Shredder	27
2.1.2	Pó do despoeiramento do forno elétrico à arco	29
3	O CONCRETO DE CIMENTO PORTLAND COM RESÍDUOS SIDERÚRGICOS FRENTE ÀS AÇÕES MECÂNICAS	34
3.1	COMPORTAMENTO DE MATRIZES CIMENTÍCIAS COM INCORPORAÇÃO DOS RESÍDUOS FRENTE ÀS AÇÕES MECÂNICAS	34
3.1.1	Pó do despoeiramento do forno elétrico à arco	35
3.1.2	Terra de Shredder	45
3.2	CONSIDERAÇÕES FINAIS	46
4	ABORDAGEM METODOLÓGICA	47
4.1	PLANEJAMENTO DOS EXPERIMENTOS	48
4.2	PROGRAMA EXPERIMENTAL.....	49
4.2.1	Matriz de experimentos	50
4.2.2	Nomenclatura das misturas	53
4.3	MATERIAIS	54
4.3.1	Cimento Portland	54
4.3.2	Agregado miúdo	55
4.3.3	Agregado graúdo	56
4.3.4	Água	56
4.3.5	Resíduos siderúrgicos	56
4.4	MÉTODOS	63
4.4.1	Dosagem e preparo dos concretos	63
4.4.2	Ensaio no estado fresco	66
4.4.3	Ensaio no estado endurecido	66
4.4.4	Ensaio ambiental	72
4.4.5	Tratamento estatístico dos dados	75
5	RESULTADOS	76

5.1	CARACTERIZAÇÃO DOS RESÍDUOS.....	76
5.1.1	Pó de FEA.....	76
5.1.2	Terra de Shredder.....	88
5.2	RESULTADOS DOS CONCRETOS COM PÓ DE FEA.....	97
5.2.1	Consistência dos concretos.....	97
5.2.2	Massa específica dos concretos e teor de ar aprisionado.....	101
5.2.3	Resistência à compressão axial.....	102
5.2.4	Resistência à tração por compressão diametral.....	111
5.2.5	Módulo de elasticidade dinâmico.....	115
5.2.6	Avaliação ambiental.....	124
5.3	RESULTADOS DOS CONCRETOS COM TERRA DE SHREDDER.....	125
5.3.1	Consistência dos concretos.....	126
5.3.2	Massa específica dos concretos e teor de ar aprisionado.....	128
5.3.3	Resistência à compressão axial.....	129
5.3.4	Resistência à tração por compressão diametral.....	135
5.3.5	Módulo de elasticidade dinâmico.....	141
5.3.6	Avaliação ambiental.....	148
6	CONCLUSÃO.....	150
6.1	CONCLUSÃO DOS ENSAIOS REALIZADOS COM O PÓ DE FEA.....	150
6.1.1	Sugestão de trabalhos futuros.....	151
6.2	CONCLUSÃO DOS ENSAIOS REALIZADOS COM A TERRA DE SHREDDER.....	151
6.2.1	Sugestão de trabalhos futuros.....	152
	REFERÊNCIAS.....	153

1 INTRODUÇÃO

No seu sentido macro, a sustentabilidade pode ser compreendida como a harmonia entre pilares sociais, econômicos e ambientais, que devem ser trabalhados de maneira simultânea. A evolução da economia deve ser conquistada ao mesmo tempo em que as necessidades da sociedade são atendidas e o ambiente permaneça sadio para as futuras gerações (AGOPYAN; JOHN, 2011). Atualmente, aspectos ambientais têm ganhado mais atenção, especialmente dentro do setor da construção civil, uma vez que ele é responsável pelo consumo de recursos naturais e geração considerável de resíduos.

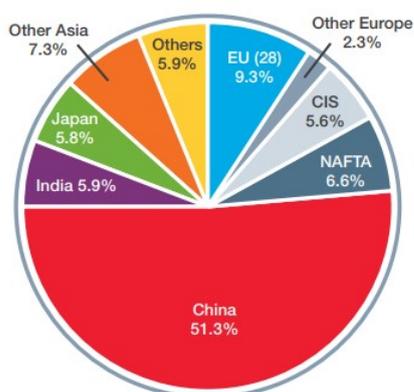
Em nível mundial, a construção civil é responsável pelo consumo de 60% das matérias-primas da terra (BRIBIÀN et al., 2011) e por 50% dos resíduos gerados (SHEPPER et al., 2014). Grande parcela destes números está associada à produção de concreto, uma vez que ele é um dos materiais mais consumidos do mundo e um dos únicos capazes de responder pelo desenvolvimento de infraestrutura, especialmente em países emergentes, devido às suas muitas vantagens, como baixo custo, propriedades mecânicas e de durabilidade adequadas, liberdade de ser moldado de várias formas e tamanhos, dentre outras.

Por conta disso, tem-se o setor da construção civil com forte impacto no contexto da política habitacional, uma vez que a falta de habitação é um dos principais problemas sociais e urbanos do Brasil e do mundo. Entretanto, este crescimento da infraestrutura ocorre, muitas vezes, de maneira desordenada, com construções feitas sem assistência profissional, levando a perdas de desempenho e maiores gerações de resíduos. Assim, o setor da construção civil é encarado como causador de muitos impactos, considerando não só a falta de planejamento, mas também toda cadeia produtiva do setor, que vai desde a extração de matérias-primas até o fim da vida útil das edificações (AGOPYAN; JOHN, 2011).

Em paralelo, o setor siderúrgico do Brasil e do mundo é grande responsável pelo fornecimento de matérias-primas para diversos outros setores, e alguns que se destacam são o automobilístico, construção civil, saúde e tecnologia, por exemplo. Isso faz com que este setor tenha grande participação no PIB e na geração de empregos. Em nível mundial, a produção de aço bruto alcançou 1,808 bilhão de toneladas em 2018, distribuídos de maneira desigual entre os países, como indica a

Figura 1, onde predomina a maior produção na China. Neste mesmo ano, o Brasil ocupou a nona posição, com uma produção de 34,9 milhões de toneladas (WSA, 2019), número muito próximo ao levantado pelo Instituto Aço Brasil, de 35 milhões (IAB, 2019).

Figura 1 - Distribuição da produção de aço mundial



Fonte: WSA (2019).

Apesar da importância que este segmento apresenta, ele também é responsável pela geração de resíduos em razão das características pertinentes de cada etapa dos processos que contribuem para a produção e conformação do produto final, o aço. De acordo com o Instituto Aço Brasil, no ano de 2020 foram produzidas 31,4 milhões de toneladas de aço bruto e, deste total, gera-se aproximadamente 63% de resíduos. E, apesar de seu potencial de reaproveitamento de 93%, os outros 7% ainda não possuem uma adequada destinação, ficando como estoque ou lançados em aterros industriais (IAB, 2021).

Além disso, espera-se que a produção total de aço no Brasil, considerando algumas proposições de crescimento do setor, aumente quase o dobro em 2050 quando comparada com os números de 2015, considerando todos os tipos de rotas de produção, conforme indica a Tabela 1, chegando a mais de 67 milhões de toneladas. Em um cenário onde não ocorram avanços no sistema produtivo, a geração de resíduos tende a aumentar consideravelmente. Vale destacar, entretanto, que no ano de 2020, conforme já mencionado, a produção brasileira total de aço bruto foi de 31,4 milhões de toneladas, abaixo da projeção feita em 2017, de 37,89 milhões de toneladas.

Tabela 1 - Projeção da produção de aço no Brasil por rota.

Ano	Aço EAF	Integradas com Coqueria	Integradas sem Coqueria	TOTAL
2015	8.284	22.866	3.272	34.422
2020	9.118	25.167	3.601	37.886
2025	10.218	28.203	4.036	42.457
2030	11.347	31.318	4.482	47.147
2035	12.495	34.486	4.935	51.916
2040	13.667	37.723	5.398	56.788
2045	14.950	41.264	5.905	62.119
2050	16.180	44.659	6.391	67.230

Fonte: BRASIL (2017).

Diante desses dois cenários, há uma cobrança cada vez mais forte para que as indústrias desenvolvam suas atividades de forma mais sustentável. No Brasil, essa cobrança acarreta em ações governamentais, como a Resolução CONAMA nº 307, por exemplo, que, dentro do segmento da construção civil, estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos gerados (BRASIL, 2002). De maneira mais abrangente aos setores apresentados tem-se também a Lei nº 12.305 que instituiu, em 2010, a Política Nacional de Resíduos Sólidos com a responsabilidade, de maneira compartilhada, entre o poder público e privado pelo gerenciamento dos resíduos gerados.

Considerando este contexto onde existem dois segmentos com grande perspectiva de crescimento e sabendo do impacto ambiental que ambos podem causar, é fundamental o estudo acerca de emprego de resíduos siderúrgicos em matrizes cimentícias, considerando ainda que o setor da construção civil é um dos maiores receptores de subprodutos de outras indústrias.

Esta possibilidade de aceitação dos resíduos por parte da indústria da construção civil ocorre principalmente pela capacidade dos materiais a base de cimento de encapsular e estabilizar os metais pesados, garantindo a integridade estrutural e até melhorando o desempenho do material sem prejudicar a saúde dos usuários. Neste processo, utiliza-se um fixador como agente solidificante, e o mais empregado é o cimento Portland, pois as reações químicas ocorrem em temperatura ambiente e seu endurecimento ocorre em poucas horas. A capacidade de fixação desses metais pesados depende, dentre outros fatores, da quantidade de água e resíduo utilizado

na matriz, do tipo de cimento e das condições ambientais em que o material solidificado será aplicado (BREHM et al., 2013).

Ademais, é fundamental realizar ensaios que garantam esta estabilização depois de aplicado no produto final, porém, no Brasil, só existe uma norma de lixiviação, a NBR 10.005 (ABNT, 2004) que avalia o material de forma granular, e não como um material monólito, como os materiais aplicados na indústria da construção civil, fazendo com que seja necessária a aplicação de outras técnicas, como a apresentada na norma holandesa EA NEN 7375:2004 (OLIVEIRA et al., 2015).

Além disso, o emprego desses resíduos e subprodutos contribui para diminuição do consumo de recursos naturais, como abertura de novas pedreiras para extração de matérias-primas para fabricação do cimento, ou uso como agregados. Assim, justifica-se a busca por uma melhor destinação desses materiais por meio de estudos com a incorporação dos resíduos siderúrgicos, que poderiam contaminar o solo e o lençol freático, em matrizes cimentícias.

Deve-se considerar também não só a capacidade de aceitação dos resíduos que o concreto oferece como também as possibilidades de melhoria em termos de desempenho mecânico e de durabilidade que alguns resíduos podem proporcionar. Estudos nacionais e internacionais comprovam a eficiência do uso de resíduos provenientes do processo de fabricação do aço e dos materiais dele decorrentes em matrizes de concreto, proporcionando aumento do desempenho mecânico dos materiais produzidos (AL-TIKRITE; HADI, 2017; SENGUL, 2018; SANTOS; NUNES; FERREIRA, 2020; SHEWALUL, 2021). Diante disso, é fundamental desenvolver estudos que verifiquem a viabilidade de aproveitamento dos resíduos em outros segmentos, em especial o da construção civil, de modo a proporcionar melhor destinação ao subproduto e também o aprimoramento do desempenho mecânico dos novos compostos produzidos.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Geral

O objetivo geral desta dissertação é avaliar o comportamento mecânico e ambiental de concretos produzidos com adição de resíduos provenientes de diferentes processos de fabricação do aço.

1.1.2 Específicos

Os resíduos estudados na dissertação são a Terra de Shredder e o Pó do despoeiramento do forno elétrico a arco (Pó de FEA) e, para cada um deles, espera-se:

- Realizar a caracterização física, química, mineralógica, microestrutural e ambiental dos resíduos.
- Avaliar o efeito de diferentes percentuais de adição dos resíduos nas propriedades do concreto fresco, por meio dos ensaios de massa específica, consistência e teor de ar aprisionado.
- Avaliar o efeito de diferentes percentuais de adição dos resíduos nas propriedades mecânicas dos concretos.
 - Resistência à compressão axial
 - Resistência à tração por compressão diametral
 - Módulo de elasticidade dinâmico
- Avaliar a lixiviação de contaminantes nos concretos, de acordo com a norma EA NEN 7375 (NNI, 2004).

1.2 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Esta dissertação contará com 07 capítulos além das referências bibliográficas.

O **Capítulo 1** traz a introdução, nele será apresentado como o problema de pesquisa está inserido no contexto mundial e nacional e, com isso, fundamentar a busca por novas alternativas de materiais, além de indicar quais são os objetivos do trabalho.

No **Capítulo 2** serão apresentados os tipos de usinas siderúrgicas bem como o processo de geração dos resíduos abordados na pesquisa, sua classificação ambiental, a composição predominante e as principais pesquisas existentes com seu emprego. Também será apresentado um breve panorama da indústria siderúrgica no Brasil.

No **Capítulo 3** estão indicadas as principais considerações acerca do concreto de cimento Portland e também as ações mecânicas as quais ele é submetido ao longo de sua vida e quais fatores interferem nessas propriedades. Nele também é apresentada uma revisão bibliográfica com as principais pesquisas que envolvem o

uso dos resíduos estudados tanto em concretos como em outras matrizes de cimento, para contribuir no direcionamento da pesquisa experimental que será realizada, oferecendo todo suporte e conteúdo de artigos que já estudaram os temas para apoiar as escolhas das variáveis da pesquisa e o entendimento dos resultados.

No **Capítulo 4** estará descrita toda metodologia adotada nesta pesquisa e também o planejamento experimental escolhido, abordando os materiais e os ensaios que serão realizados.

O **Capítulo 6** será destinado à apresentação e discussão dos resultados encontrados. Nele será apresentada toda a caracterização dos resíduos, bem como o desempenho de cada mistura no estado fresco e endurecido.

No **Capítulo 7** serão apresentadas as conclusões obtidas a partir da discussão dos resultados que foi realizada no capítulo anterior.

Por fim, são exibidas todas as referências utilizadas para formulação da dissertação.

2 O SETOR SIDERÚRGICO BRASILEIRO E A APLICAÇÃO DOS RESÍDUOS GERADOS

O setor siderúrgico no Brasil ocupa uma posição de destaque na produção de ferro e aço em razão de ser um dos maiores produtores de minério de ferro do mundo tendo este material como um dos itens mais importantes da sua exportação (DUARTE, 2019). Ademais, quando se considera os contaminantes presentes, as reservas nacionais ganham destaque absoluto com as mais puras mundialmente, proporcionando conforto e segurança para a siderurgia brasileira, tornando-as fortemente competitivas em nível global (BRASIL, 2010).

Esta importância se confirma no parque industrial brasileiro representado por 31 usinas administradas por 12 grupos diferentes (IAB, 2021). Essas usinas são classificadas de acordo com seus processos produtivos e podem ser divididas em: integradas, semi-integradas e não integradas, além do preparo de carga.

As usinas integradas operam em todas as fases de produção, que são a redução, o refino e a laminação. A redução é a transformação do minério de ferro em ferro-gusa. Ela ocorre no alto-forno, com o uso de um combustível, normalmente coque ou carvão vegetal, funcionando como o agente redutor, que é responsável pela separação do metal Ferro (Fe) do seu óxido, o minério de ferro (Fe_2O_3). Com a produção do ferro-gusa fundida, inicia-se a etapa de refino que é responsável por transformar este gusa em aço líquido, que ocorre na aciaria do processo LD (Linz e Donawitz) ou BOF (Basic oxygen Furnace) que tem como objetivo reduzir os teores de carbono e outras impurezas do ferro-gusa por meio de sopros de oxigênio que oxidam estes compostos (SAKO; PANDOLFELLI, 2014). E por fim ele é encaminhado à laminação para transformá-lo em uma variedade de produtos siderúrgicos.

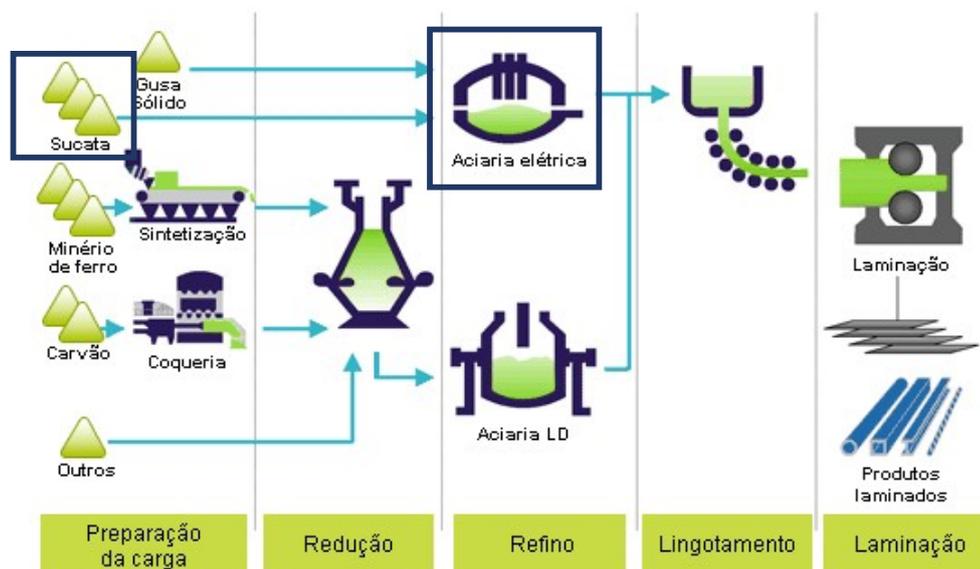
As usinas semi-integradas já iniciam suas atividades na etapa de refino, pois partem do ferro-gusa sólido ou sucata metálica como matérias-primas, dispensando as atividades de coqueificação, sinterização e produção do ferro-gusa pelo alto-forno, assim elas operam em apenas duas fases de produção: refino e laminação. Essas matérias-primas são encaminhadas direto para a aciaria elétrica que funciona por meio de um arco elétrico com passagem contínua de corrente elétrica entre um cátodo e um ânodo que ficam dentro forno, e, pelo aquecimento, promovem a fundição da matéria-prima e transformação do aço (ROSSI, 2014).

Já as não integradas operam em uma única fase do processo, que é o processamento (laminação ou trefilas) ou a redução. Quando ocorre o processamento por meio da laminação é para a formação de placas e tarugos, e quando ele ocorre por meio da trefilação é para a produção de arames e barras. Caso a etapa seja de redução, estas usinas são exclusivamente produtoras de ferro-gusa (IAB, 2019).

Em relação à preparação de carga, no que diz respeito ao aproveitamento de sucatas, é importante mencionar que as empresas dispõem de pátios para beneficiamento dessas sucatas que são posteriormente encaminhadas para alimentação dos fornos nas usinas semi-integradas.

Na Figura 2, pode-se verificar as cinco fases de produção (preparação da carga, redução, refino, lingotamento e laminação). Os resíduos siderúrgicos estudados nesta pesquisa são gerados nas usinas semi-integradas (que já partem do refino) e na etapa de preparação de carga: A Terra de Shredder é gerada na preparação de carga, quando a matéria-prima é proveniente de sucatas ferrosas e o Pó de FEA, na aciaria elétrica. Na Figura 2 estão indicadas essas duas etapas.

Figura 2 - Fluxo simplificado de produção do aço.



Fonte: IAB (2019).

A fase de lingotamento é comum à todas as rotas de produção. O lingotamento é a transformação do aço líquido em sólido utilizando processos de refrigeração. Ele pode ocorrer de maneira convencional ou contínua. No lingotamento convencional, a solidificação do aço ocorre em moldes individuais de lingotes, já no lingotamento contínuo há um sequenciamento de corridas onde o aço líquido é transferido para um

distribuidor que então encaminha para os moldes, assim, é fundamental um controle de temperatura e tempo neste processo para que tenha uma boa produtividade (ROSSI, 2014).

2.1 GERAÇÃO DOS RESÍDUOS E SUA COMPOSIÇÃO NAS USINAS SEMI-INTEGRADAS E NO PREPARO DE CARGA

Neste item são apresentadas informações sobre o processo de geração dos resíduos, as composições químicas predominantes em cada um deles e as classificações ambientais encontradas, além das principais pesquisas com eles desenvolvidas. Os dois resíduos são provenientes de um mesmo ciclo produtivo: a sucata reaproveitada é encaminhada à aciaria elétrica, onde é gerado o Pó de FEA.

Entretanto, o Pó de FEA é gerado na usina semi-integrada, que é alimentada com o gusa sólido ou com as sucatas enquanto a Terra de Shredder é gerada em etapas anteriores de beneficiamento das sucatas que são reaproveitadas, em pátios específicos para essa atividade.

2.1.1 Terra de Shredder

Quando ocorre o aproveitamento de sucatas metálicas, é necessário que a siderúrgica disponha de equipamentos responsáveis pela sua trituração, que são chamados “Shredder” e recebem variados tipos de sucata, que podem ser provenientes do próprio processo de fabricação do aço na usina ou por meio do descarte de bens pela sociedade, como geladeiras, ar condicionado, máquinas, equipamentos e, como fonte principal, os veículos em fim de vida (VFV).

Este sistema de aproveitamento de matéria-prima é composto por um alimentador, triturador, transferência de material por separador magnético, catação, pesagem, empilhamento, retirada de poeira e sistema de injeção eletrônica de água, de modo a garantir que a sucata ferrosa saia livre de impurezas, fragmentada e com qualidade suficiente para alimentar os fornos na aciaria (JUNIOR, 2013).

Com este processo, grande quantidade da fração metálica ferrosa é reaproveitada no processo de fabricação do aço, enquanto a parte triturada e não metálica, conhecida como resíduo de Shredder é descartada, normalmente em aterros, e pode ser dividida em duas frações (CAETANO, 2016):

- Fluf da Shredder (fração leve): abrange os materiais leves, como plástico, borracha, tecidos e espuma.
- Terra da Shredder (fração pesada): abrange os materiais de pequena granulometria, com aspecto de terra.

A composição deste resíduo, tanto o fluff quanto a terra, depende essencialmente da alimentação que a máquina recebe, ao passo que se a sucata não receber um tratamento adequado de limpeza, compostos perigosos podem permanecer nos resíduos (CAETANO, 2016). Normalmente estes resíduos são lançados em aterros industriais podendo causar a contaminação do solo e do lençol freático.

Comprovando a composição química heterogênea, Vermeulen et al. (2011) reuniram algumas composições para a fração pesada do resíduo da Shredder, equivalente ao que é classificado no Brasil como a Terra de Shredder. Essa composição é apresentada na Tabela 2, onde pode-se perceber grande variação.

Tabela 2 - Composição, em porcentagem de massa, da fração pesada do resíduo da Shredder.

	Kim et al., (2004)	Hjelmar et al., (2009)	Lin; Chowdhury; Wang, (2010)	Marco et al., (2002)
Metais	0,2 - 1,4	5	0,7	-
Fios	7,0 – 12,7	3	-	0,7
Borracha	14,1 – 17,3	35	43,7	44,8
Têxteis	7,7 – 11,6	3	10,5	10,5
Espuma	0,9 – 2,8		-	3,3
Plástico	23,8 – 30,9	19	32,6	29
Madeira	0,06 – 0,7	7	4,7	5,6
Papel	1 – 2,5		-	-
Solo/areia	7,6 – 12,3	8 (minerais)	-	-
Vidro	8,3 – 11,0	-	-	-
Outros	4,6 – 14,0	-	7,8	6,1 (finos)

Fonte: Adaptado de Vermeulen et al. (2011).

Para Batista (2014), que analisou uma série de amostras retiradas de plantas localizadas em São Paulo, os intervalos encontrados foram os seguintes: 0,48 – 3,85% de argila, 16,98 – 36,57% de silte, 59,85 – 82,31% de areia total (grossa e fina).

Por essa razão, sua classificação ambiental pode variar de um local para outro. Vermeulen et al. (2011) identificaram que na Europa o resíduo da Shredder é classificado como perigoso, de acordo com o Capítulo 1910 na Diretiva Europeia 91-689-EEC sobre resíduos perigosos. Já Caetano, Schalch e Mazariegos (2016)

classificaram o resíduo passante na peneira de 2mm, segundo a NBR 10.004 (ABNT, 2004a), como classe II-A (não perigoso e não inerte).

De modo geral este resíduo é classificado com Classe II – A (não perigoso e não inerte) nas pesquisas nacionais, porém com diferentes elementos excedendo os limites estabelecidos (BATISTA, 2014; CAETANO, 2016; RECKZIEGEL, 2012).

A geração deste resíduo pode variar de uma região para outra. De acordo com estudos de Câmara (2017), uma única usina semi-integrada foi responsável pela geração de quase 74 mil toneladas do resíduo da Shredder no ano de 2016, no Brasil. Deste total, alguns autores defendem que aproximadamente 50% compõem a fração Terra de Shredder e os outros 50% são a fração Fluff da Shredder (BATISTA, 2014).

Pela sua forte heterogeneidade algumas pesquisas no Brasil trabalham com o resíduo como substituição ao agregado miúdo e às argilas. Em relação ao uso como substituição ao agregado miúdo, pesquisas abordam a confecção de blocos de concreto para pavimentação utilizando o resíduo em diferentes porcentagens (CAETANO, 2016), e para a argila, a substituição foi feita no emprego de blocos cerâmicos estruturais, também com diferentes porcentagens de substituição avaliadas (FIGUEIREDO, 2016). Para avaliação do comportamento de materiais cimentícios com o resíduo em sua granulometria fina, como a do cimento, não foram encontrados estudos.

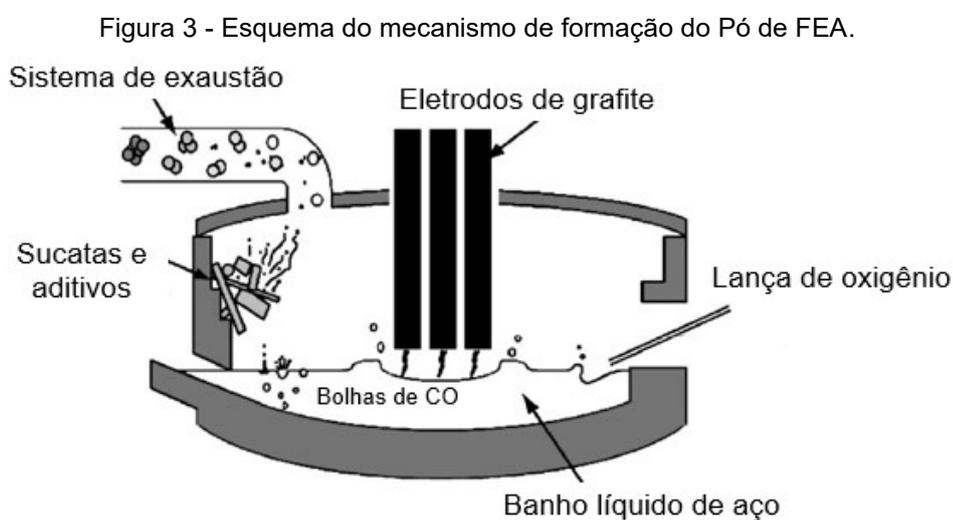
Internacionalmente algumas pesquisas estudam o reaproveitamento energético deste material como combustível sólido, por meio de processos térmicos, onde a fração de Fluff, com granulometria entre 50 e 100 mm, se mostra mais adequada para esta aplicação (EDO et al., 2013). Vermeulen et al. (2011) ainda apostam na aplicação deste resíduo em usinas geradoras de energia por meio de incineração e até mesmo em forno de fabricação de cimento e alto-forno das próprias siderúrgicas também com melhores resultados para as frações de maior granulometria do resíduo.

2.1.2 Pó do despoejamento do forno elétrico à arco

Na aciaria elétrica, a matéria-prima pode ser proveniente tanto do gusa sólido quanto das sucatas metálicas. Esta matéria-prima para fabricação do aço é encaminhada para alimentação do forno junto com alguns aditivos como cal e carvão. Em seguida, pela formação de um arco elétrico entre eletrodos de grafite e a própria sucata, ocorre

a fusão desses materiais formando um banho de aço (ARAÚJO, 2014; GUEZENNEC et al., 2005). A Figura 3 exemplifica este processo.

Após a fusão, inicia-se a etapa de refino do material por meio de reações de desfosforação, dessulfuração e descarburização. A primeira objetiva a retirada do fósforo do banho de aço, a segunda, por meio de agentes dessulfurantes, reagem com o enxofre e o transformam em escória e a última ocorre com a injeção de oxigênio no sistema, formando óxidos de carbono. Esta última etapa, de descarburização, é a mais importante e é a responsável pela geração de bolhas de monóxido de carbono, reduzindo o teor de carbono da mistura e garantindo a qualidade do material (PAULA, 2013).



Fonte: Adaptado de Guezennec *et al.* (2005).

As emissões do pó ocorrem em todas as etapas de operação do forno elétrico. Já na etapa de fusão alguns elementos começam a volatilizar e serem removidas do banho de aço, como o zinco que possui baixo ponto de ebulição (907°C). A geração do resíduo também está associada à volatilização e ruptura das bolhas de monóxido de carbono formadas na etapa de descarburização, que transportam parte dos metais pesados presentes no banho. De modo geral, por meio da geração de calor, ocorre a geração de partículas sólidas e gases no interior do forno a temperaturas que variam de 1500°C até 5000°C . Essas partículas formam-se a partir de fenômenos físico-químicos que pulverizam e liberam alguns óxidos, como de ferro, silício, cálcio, manganês e outros e também por meio do processo de vaporização, oxidação, resfriamento e solidificação destes materiais, que são coletados nos filtros de manga

ou precipitadores eletrostáticos (ALVES, 2019; ARAÚJO, 2014; GUEZENNEC et al., 2005).

A composição e algumas propriedades químicas e físicas deste resíduo podem variar pois o material é dependente de alguns fatores como composição e qualidade da sucata que está sendo reaproveitada, o tipo de aço a ser fabricado e as adições de liga que fazem parte da carga inserida (ALVES, 2019; LEDESMA et al., 2017). Quando a sucata é muito rica em aço galvanizado, por exemplo, o teor de zinco aumenta, fazendo com que a composição mineralógica seja rica em óxido de zinco (ZnO). A Tabela 3 apresenta intervalos típicos da composição do Pó de FEA, comprovando que ela é diretamente influenciada pelos fatores já mencionados, especialmente para os óxidos de ferro e zinco, com os maiores intervalos.

Tabela 3 - Composição média do pó do despoejamento do forno elétrico a arco (em porcentagem).

	Alves (2019)	Paula (2013)	Suetens (2014)
Ferro	10,0 - 47,0	10,0 - 45,0	20,0 - 45,0
Zinco	11,0 - 46,0	2,0 - 46,0	14,0 - 35,0
Cálcio	1,0 - 10,0	1,0 - 16,0	3,0 - 10,0
Sódio	0,1 - 2,4	0,5 - 3,8	1,5 - 2,0
Silício	0,1 - 2,5	1,0 - 5,0	3,0 - 6,0
Magnésio	0,1 - 3,0	1,0 - 12,0	-
Potássio	0,06 - 1,0	0,35 - 4,3	1,0 - 1,5
Chumbo	0,5 - 3,8	-	2,0 - 8,0
Alumínio	0,1 - 1,0	0,1 - 1,8	-
Cobre	0,01 - 2,3	< 3,0	-
Manganês	2,4 - 4,6	1,0 - 5,5	-
Cádmio	0,01 - 0,3	0,01 - 1,5	0,1 - 0,2
Cromo	0,06 - 0,6	0,2 - 6,5	-
Níquel	0,01 - 0,1	-	-
Enxofre	-	1,5 - 2,5	-
Cloro	-	-	1,0 - 5,0
Flúor	-	-	0,2 - 0,5
Carbono	-	-	1,0 - 5,0
Mercúrio	-	-	1,0 - 5ppm

Fonte: Alves (2019); Suetens et al. (2014) e Paula (2013).

Sua geração se apresenta entre 15 a 20 kg por tonelada de aço produzida (STATHOPOULOS et al., 2013). Além disso, mais da metade deste resíduo ainda é encaminhada aos aterros sanitários, fazendo com que aproximadamente 7% da produção mundial de zinco seja perdida, conforme apresenta a Tabela 4.

Tabela 4 - Quantidade de resíduo gerado, reciclado e descartado em aterro e porcentagem de zinco em relação à produção mundial (dados de 2013).

	Quantidade de resíduo (em milhões de toneladas)	Quantidade de zinco (em milhões de toneladas)	Porcentagem relacionada a produção mundial de zinco
Geral	8,5	1,7	13,0%
Reciclado	4,0	0,8	6,0%
Aterro sanitário	4,5	0,9	7,0%

Fonte: Antrekowitsch (2015).

Por conta da presença de metais pesados neste resíduo, proveniente das sucatas e das reações químicas que ocorrem dentro do forno, ele é classificado, de maneira geral, como Classe I (Perigoso) segundo a NBR 10.004 (ABNT, 2004a; SILVA, 2006). Corroborando este resultado, Vargas, Masuero e Vilela (2004), identificaram que o resíduo possui os limites de cádmio e chumbo excedentes aos parâmetros estabelecidos pela NBR 10.004 (ABNT, 2004) se enquadrando também nesta classificação.

Internacionalmente, também é possível verificar que este resíduo extrapola os parâmetros estabelecidos: Vahcic et al. (2008) identificaram que o chumbo ultrapassou os limites indicados na norma de caracterização de resíduos da Eslovênia. Por fim, ratificando todos os resultados, Lozano-Lunar et al. (2019a), realizaram a classificação de duas amostras diferentes do resíduo de acordo com o teste UNE-EN 12457-4: 2003 da Espanha e ambas foram classificadas como perigosa segundo a diretiva Europeia 33 de 2003. Na amostra 1 observou-se que o selênio e o Cádmio excederam os limites, enquanto na amostra 2 os elementos que excederam os limites foram selênio, molibdênio e chumbo.

O pó do despoeiramento do forno elétrico a arco (Pó de FEA) é um material com estudos diversificados, que passam pelo emprego em argamassas de cimento, cerâmicas, concretos e até por processo de recuperação do zinco, uma vez que, por conta do tipo de sucata reciclada, este componente pode estar presente em teores que podem variar de 2% até 43% (REMUS et al., 2013) além do fato de que este elemento é fundamental em várias aplicações nas indústrias metalúrgicas e químicas por exemplo.

Para a recuperação de zinco, basicamente dois processos são empregados, o pirometalúrgico e o hidrometalúrgico. No hidrometalúrgico, o zinco é recuperado por meio da técnica de lixiviação com agentes lixiviantes como cloreto de amônio, ácido

clorídrico e hidróxido de sódio, por exemplo (LANZERSTOFER, 2018). Após este procedimento, o zinco é separado desta solução por diferentes métodos como precipitação, cristalização, extração dos solventes, troca iônica ou eletrólise (JHA; HUMAR; SINGH, 2001).

Já o processo pirometalúrgico baseia-se na extração do zinco por meio da fusão do material a temperaturas elevadas (entre 1200°C e 1500°C) promovendo a vaporização desse elemento na presença de termoredutores a base de carbono (redução carbotérmica) (CANTARINO, 2011). Em seguida, esses vapores gerados podem ser condensados e separados para reutilização (LIN et al., 2017). Esse processo é o mais empregado em escala industrial, mas apresenta alguns pontos desfavoráveis como o alto consumo energético, elevado uso de combustíveis de carbono e a necessidade de tratamento das emissões gasosas (CANTARINO, 2011).

Em matrizes de concreto, os autores estudam como este resíduo influencia as propriedades no estado fresco e endurecido, bem como a capacidade dessas matrizes em estabilizar os metais pesados contidos no resíduo, com porcentagens de incorporação que alcançam até 20% (SOUZA et al., 2010; MASLEHUDDIN et al., 2011; MANTOVANI; KULAKOWSKI; MORAES, 2014; ALIZADEH; MOMENI, 2016).

Além disso, o resíduo também é aplicado na produção de cerâmica vermelha e em argamassas, onde são avaliados, assim como nas matrizes de concreto, aspectos mecânicos e a capacidade dos blocos em encapsular os metais pesados ali presentes (VIEIRA et al., 2013; LEDESMA, et al., 2017; MAGALHÃES et al., 2017; LOZANO-LUNAR et al., 2019a). Ainda na construção civil, diversos estudos apostam também na sua aplicação como aditivo em asfaltos modificados e cimentos álcali-ativados (NIKOLIC, et al. 2020; LOAIZA; CIFUENTES; COLORADO, 2017).

3 O CONCRETO DE CIMENTO PORTLAND COM RESÍDUOS SIDERÚRGICOS FRENTE ÀS AÇÕES MECÂNICAS

O concreto é o material de construção mais utilizado mundialmente, normalmente composto de cimento Portland, areia, brita e água. Algumas razões para esta importância são a excelente resistência à ação da água, a variedade de formas e tamanhos, atribuída a consistência plástica que ele oferece inicialmente e, por fim, o baixo custo e rápida disponibilidade, pois os materiais são facilmente encontrados em todos os lugares do mundo (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

Na construção civil, especialmente no uso do concreto de cimento Portland, quando é necessário realizar a seleção deste material construtivo, deve-se considerar a carga a qual aquele material estará submetido. No dimensionamento de estruturas de concreto, considera-se que ele é adequado para suportar, especialmente, esforços de compressão, carga fortemente presente em habitações. Os esforços de tração e flexão são aproximadamente 10% e 15% da resistência à compressão, respectivamente.

Para que se sejam cumpridas exigências de durabilidade em estruturas de concreto, a NBR 6118 recomenda que elas sejam projetadas e construídas conservando sua segurança, estabilidade e aptidão em serviço durante todo prazo correspondente a sua vida útil, dentro das condições ambientais previstas na época de projeto e utilizadas conforme ela recomenda (ABNT, 2014a).

Diante disso, em estruturas de concreto, sejam elas em concreto armado ou protendido, este material tem grande responsabilidade na vida útil das edificações e, por isso, deve ser capaz de atender algumas propriedades fundamentais. Estas propriedades desejáveis no concreto endurecido são a resistência, estabilidade dimensional e a durabilidade (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

3.1 COMPORTAMENTO DE MATRIZES CIMENTÍCIAS COM INCORPORAÇÃO DOS RESÍDUOS FRENTE ÀS AÇÕES MECÂNICAS

As aplicações dos resíduos, tanto em argamassas e pastas, quanto em concreto, como será desenvolvida nesta pesquisa, contribuem para o melhor entendimento do comportamento que cada resíduo pode desempenhar em matrizes cimentícias. Nos próximos tópicos são apresentadas as principais pesquisas desenvolvidas para os

resíduos estudados bem como os resultados encontrados, tornando-se suporte para avaliação dos resultados aqui identificados.

3.1.1 Pó do despoejamento do forno elétrico à arco

As aplicações do Pó de FEA em matrizes de concreto de maneira geral apresentam resultados positivos no que tange às avaliações das propriedades mecânicas. Além disso, algumas outras aplicações como em argamassas e pastas de cimento contribuem para o melhor entendimento do comportamento do resíduo quando inseridos em concreto.

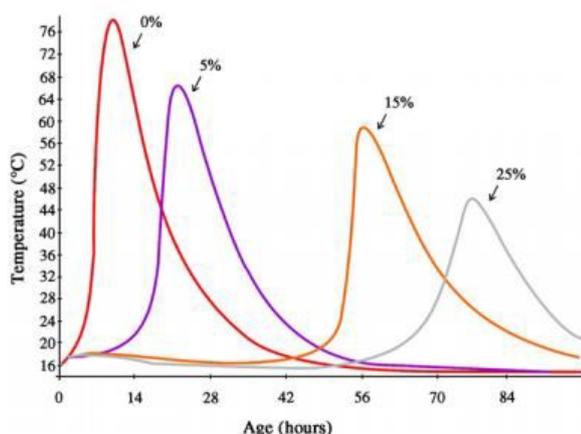
Um comportamento já consolidado das matrizes de cimento com a incorporação do pó de FEA é o impacto no tempo de endurecimento que elas apresentam, ao passo que quanto maior a incorporação, maior é o atraso no tempo de pega inicial e final que das misturas.

Esse comportamento está diretamente relacionado ao teor de zinco na amostra. O processo de hidratação que ocorre no cimento quando há a presença deste resíduo é interrompido primeiramente por que ocorre formação de um hidróxido de zinco – $Zn(OH)_2$ que reveste a superfície dos grãos anidros de cimento, em especial o C_3S . Após essa etapa as concentrações de Ca^{+2} e OH^- transformam o hidróxido de zinco em um composto cristalino de hidróxido de cálcio e zinco – hidrozincato de cálcio ($[CaZn_2(OH)_6 \cdot 2H_2O]$ – C-Z-H). À medida em que está ocorrendo o processo de cura e hidratação, há um aumento do pH do concreto que promove a retomada do processo de hidratação (MAGALHÃES et al., 2017; SOUZA et al., 2010).

Tal comportamento é semelhante ao que os aditivos retardadores de pega fazem: criam barreiras insolúveis ao redor dos grãos de cimento dificultando o progresso da hidratação. Diferentes substâncias químicas podem atuar com esta função de retardar a pega do cimento e, dentre elas, estão os compostos químicos a base de zinco (DAAKE; STEPHAN, 2017).

Um estudo de aplicação do resíduo em pastas de cimento, com adições de 5%, 15% e 25% em relação à massa de cimento comprovou, por meio do ensaio da determinação do calor de hidratação, a capacidade do resíduo de influenciar no progresso da hidratação do cimento, como pode ser visto na Figura 4 (VARGAS; MASUERO; VILELA, 2006). Neste estudo, o conteúdo de zinco presente na amostra é de 13,30%.

Figura 4 - Curva do calor de hidratação das pastas avaliadas.



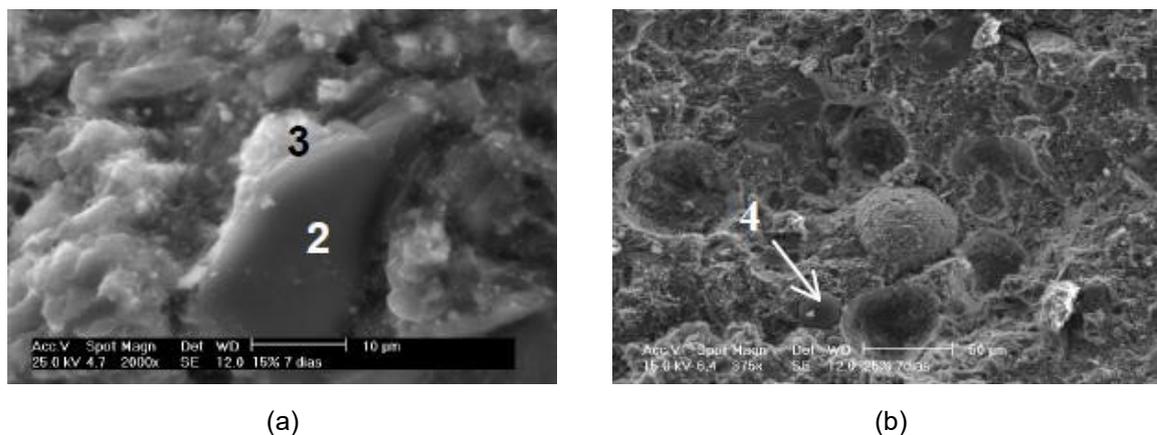
Fonte: Vargas, Masuero, Vilela (2006).

Nela é possível perceber que ao passo que o teor de adição aumentava, os picos de temperatura ocorriam mais tardiamente. Além disso, a curva da mistura de referência possui uma base mais estreita, indicando alta liberação de calor em um curto período de tempo. Quando adiciona o resíduo, a curva diminui e a base se torna mais larga, indicando uma liberação de calor mais lenta (VARGAS; MASUERO; VILELA, 2004).

Ainda neste estudo, foi avaliado o efeito da incorporação do resíduo em nível microestrutural, por meio das técnicas de microscopia eletrônica de varredura e difração de raios-X. Foi visto que picos de hidróxido de cálcio diminuem com o acréscimo dos teores do resíduo, confirmando que os metais presentes no resíduo consomem este composto. Há formação de novos outros picos ao passo em que se incorpora o resíduo, como o hidrozincato de cálcio (C-Z-H), silicato de potássio e alumínio, franklinita, magnetita, entre outros.

Na análise por MEV e EDS os autores encontraram partículas de resíduo aparentemente inertes nas pastas aos 7 dias com 25% de substituição, pela grande quantidade de zinco e ferro encontrada. As pastas de 15% nesta mesma idade apresentam possíveis formações de compostos, uma vez que há predominância de elementos como cálcio e sílica, e menores quantidades de ferro e zinco. Na Figura 5 são apresentadas as micrografias e a composição química de cada ponto.

Figura 5 - MEV das pastas de 7 dias com adição de 15% de resíduo e ampliação de 2000x (a) e 25% de resíduo com ampliação de 375x (b)



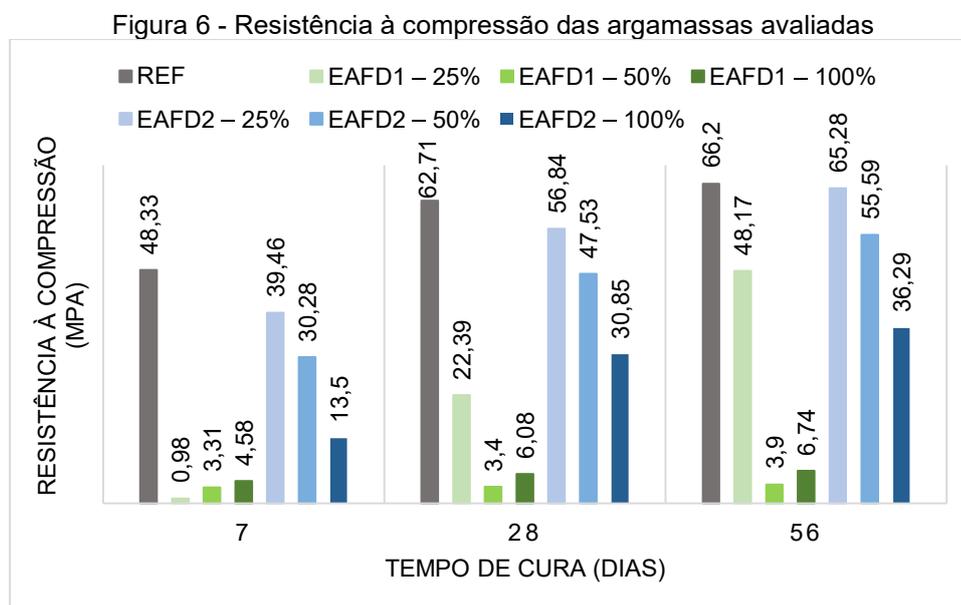
Nº	Elementos (%)												
	O	Mg	Al	Si	S	K	Ca	Fe	Zn	Mn	Na	Cr	Ni
2	32,5	-	-	-	0,9	-	61,5	1,4	2,1	-	1,5	-	-
3	35,6	1,8	3,8	10,9	1,5	1,5	36,3	6,0	2,7	-	-	-	-
4	23,5	0,7	-	1,9	-	-	2,5	55,0	9,0	0,8	-	-	2,4

Fonte: Vargas, Masuero e Vilela (2004).

Al-Negheimish et al. (2021) realizaram um estudo correlacionando o conteúdo de zinco de 5 amostras de resíduo com sua influencia no tempo de pega de pastas de cimento. Foi feita uma incorporação de 3% de resíduo nas 5 pastas de cimento sendo que o percentual de zinco das 5 amostras variava de 0% até 20%. Como resultado, os autores obtiveram uma equação indicando a relação linear e crescente entre o tempo de pega e o teor de zinco das amostras, confirmando que este elemento tem papel de destaque na hidratação das misturas cimentícias. Os autores sugerem o uso do resíduo como retardador de pega ou como adição mineral em matrizes de cimento, tendo seu uso combinado com aceleradores químicos.

Estudos de Lozano-Lunar *et al.* (2019a) e Lozano-Lunar *et al.* (2019b) também identificaram períodos de indução mais longos e lenta liberação de calor em amostras de argamassas autoadensáveis. A pesquisa avaliou comportamentos mecânicos de duas amostras do resíduo – EAFD1 e EAFD2 que foram substituídas pela fração volumétrica da sílica em porcentagens de 25%, 50% e 100%, sendo que a composição da mistura de referência é de 50% de cimento e 50% de sílica ativa e a proporção volumétrica entre aglomerantes e areia é de 0,7. A amostra 1 apresentava maior concentração de zinco em relação à amostra 2: 38,27% e 34,22%, respectivamente, e a amostra 2 apresentou finura superior pelo ensaio de superfície específica. Nos

ensaios de resistência a compressão, os autores encontram os resultados apresentados na Figura 6.



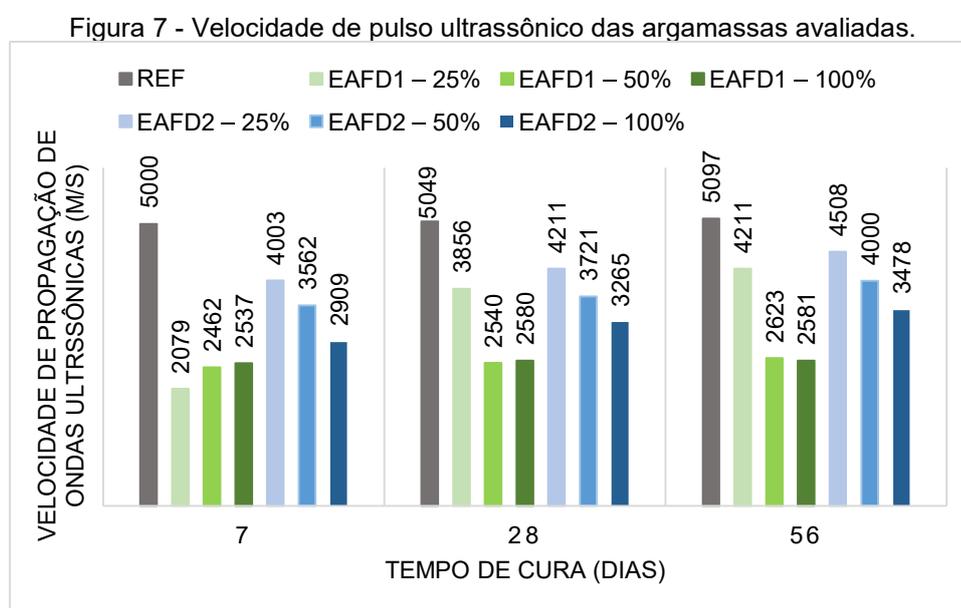
Fonte: Adaptado de Lozano-Lunar et al. (2019a).

A amostra 1 apresentou grande atraso no alcance de resistência das amostras de referência, atribuído, principalmente, ao teor de zinco, que reage com o hidróxido de cálcio, semelhante à uma reação pozolânica, porém neste caso inibindo o processo de hidratação pela formação do hidrozincato de cálcio ($\text{CaZn}_2(\text{OH})_6 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) revestindo as partículas de cimento, semelhante ao encontrado por outros estudos (MAGALHÃES et al., 2017; LEDESMA et al., 2017; SOUZA et al., 2010; VARGAS; MASUERO; VILELA, 2004). Para esta amostra, apenas a substituição de 25% apresentou recuperação aos 56 dias, comprovando uma retomada no processo de hidratação. Este fenômeno foi comprovado por meio da técnica de DRX onde, aos 28 e 56 dias foi possível identificar picos de portlandita, indicando a continuidade deste processo. Nas substituições de 50% e 100%, entende-se que até os 56 dias de cura as reações de hidratação ainda não haviam retomado (LOZANO-LUNAR *et al*, 2019a).

Em relação à amostra 2, houve um comportamento de perda de resistência ao passo em que aumentava a quantidade de resíduo, o que é esperado, considerando sua ação no processo de hidratação, porém a redução foi significativamente menor quando comparada com a amostra 1 e todas as amostras foram consideradas viáveis do ponto de vista mecânico. Os autores explicam que este comportamento de melhor desempenho pode ser atribuído ao pH que a amostra 2 possuía, de 13,3 enquanto a

amostra 1 apresentou valor menos básico, de 9,6. O ambiente alcalino nas matrizes de cimento é que proporciona a retomada do processo de hidratação, anteriormente interrompido. Caso o resíduo apresente um pH mais básico, próximo ao de matrizes cimentícias, este processo de retomada pode ser favorecido, refletindo em outras propriedades, como a resistência mecânica (LOZANO LUNAR et al., 2019b; LEDESMA et al., 2018).

Por fim, neste mesmo estudo, foi verificada a velocidade de onda ultrassônica de todas as argamassas com o resíduo e a de referência, classificando-as em “excelente” – acima de 4500m/s, “boa” – acima de 3500m/s e “ruim” – acima de 2000m/s, conforme é apresentado na Figura 7. Com os resultados percebe-se que, para as argamassas com a amostra 2, apesar de valores baixos nas idades de 7 dias, ao passo em que ocorria a hidratação, a velocidade de onda ultrassônica aumentava, até que aos 56 dias as classificações eram “bom” e “excelente” para as substituições de 50% e 25%, respectivamente. Para as argamassas com a amostra 1, os resultados encontrados foram mais baixos, porém para 25% de substituição a classificação aos 56 dias foi “boa”, tal qual ocorreu com a resistência à compressão, onde apenas esta porcentagem mostrou resultado satisfatório (LOZANO-LUNAR et al., 2019a).

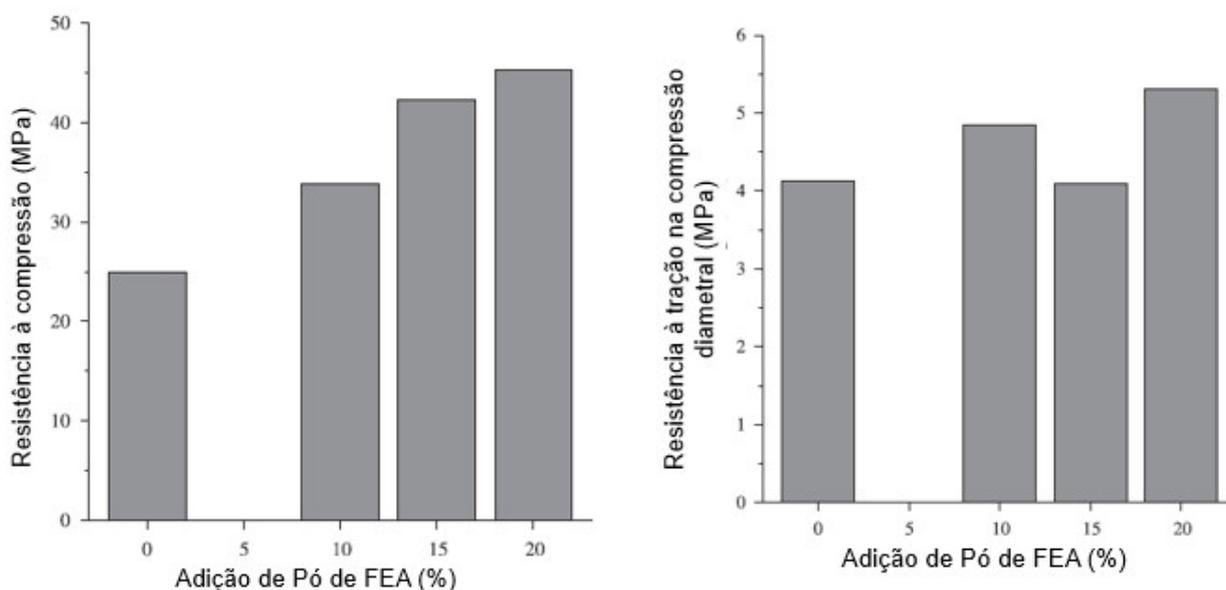


Fonte: Lozano-Lunar et al. (2019).

Diferentemente das argamassas, os estudos em concreto apresentam ganho de resistência à medida em que ocorre aumento do teor de incorporação. Estudos com este resíduo na aplicação em concreto, com teores de adição em massa pelo cimento

de 0%, 10%, 15% e 20% e com uma relação a/c de 0,54, demonstraram um aumento da resistência à compressão aos 28 dias de idade com o aumento do teor de incorporação do resíduo. Em relação à resistência à tração por compressão diametral, foram constatados valores semelhantes ou ligeiramente superiores ao concreto de referência (sem o resíduo) (SOUZA et al., 2010). A Figura 8 apresenta os resultados encontrados pelos autores.

Figura 8 - Resultados de resistência à compressão (a) e à tração (b) dos concretos produzidos



Fonte: Souza et al. (2010)

Os mesmos autores relatam que esse ganho de resistência está relacionado à quantidade de finos presentes no resíduo, que possui uma superfície específica de 7310 cm²/g. Esses finos aumentam a homogeneidade e densidade bem como reduzem a porosidade do concreto, aumentando a capacidade de suporte de cargas. Também foi avaliado o tempo de pega em pastas produzidas e foi identificado um forte atraso à medida em que aumenta-se o teor de resíduo incorporado, precisando de mais de 48 horas para o endurecimento completo dos corpos-de-prova. Apesar disto, é válido considerar também que o resíduo utilizado possui um conteúdo de zinco de 10,76%, considerado baixo quando comparado com outras amostras, o que pode ter contribuído para a rápida recuperação do processo de hidratação sem impacto negativo nas propriedades mecânicas aos 28 dias de idade.

Outro estudo em concreto investigou dois teores de substituição do cimento, que são 2% e 3% e avaliou, dentre outras propriedades, o tempo de pega, resistência à compressão e à tração. Nesta avaliação também houve aumento do tempo de

endurecimento ao passo em que se deu o incremento das porcentagens de substituição, alcançando um tempo de pega final de quase 34 horas para a mistura com 3% enquanto para a mistura de referência o tempo final foi de 5 horas e 43 minutos. A amostra empregada possui um conteúdo de zinco de 10,7% (AL-ZAID; AL-SUGAIR; AL-NEGHEIMISH, 1997).

O ensaio de resistência à compressão foi feito aos 3, 7, 28, 90 e 210 dias e para todas as idades avaliadas foi constatado um aumento dessa propriedade com o aumento da incorporação do resíduo. A resistência à tração apresentou comportamento semelhante, mas a verificação foi feita apenas aos 28 dias. Tais resultados comprovam que o resíduo, nestas porcentagens, pode atuar como um retardador do tempo de pega além de aprimorar as propriedades mecânicas de compressão e tração sem efeitos colaterais (AL-ZAID; AL-SUGAIR; AL-NEGHEIMISH, 1997).

A aplicação do resíduo em concretos com cimentos que possuam adições minerais também foi verificada por meio da confecção de misturas com três tipos de cimentos: o primeiro sem adições minerais, o segundo com 8% de sílica ativa e o terceiro com 30% de cinzas volantes. Foram feitos ensaios em todos os três mencionados e também nestas mesmas misturas com substituição de 2% das adições minerais pelo resíduo, totalizando 6 misturas (MASLEHUDDIN et al., 2011):

- 100% cimento
- 92% + 8% de sílica ativa
- 70% cimento + 30% de cinza volante
- 98% cimento + 2% de Pó de FEA
- 92% cimento + 6% sílica + 2% Pó de FEA
- 70% cimento + 28% cinza volante + 2% Pó de FEA

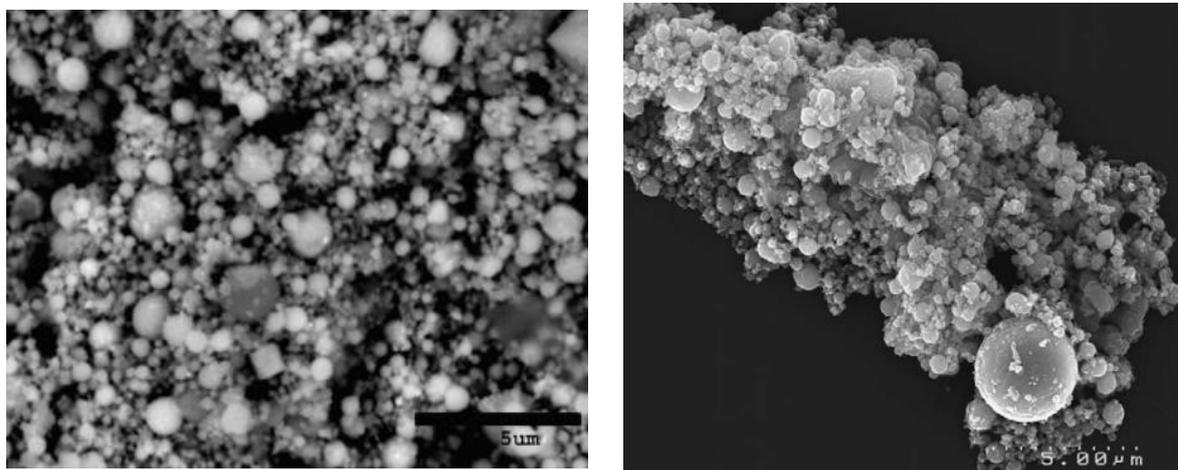
Neste estudo, o tempo inicial de pega de todas as misturas com a incorporação do resíduo aumentou pelo menos 13 horas em relação à mesma mistura sem o pó de FEA enquanto o tempo final de pega aumentou ao menos 18 horas. Em relação à resistência à compressão, houve aumento com a idade em todos os corpos-de-prova, entretanto, quando se comparou as resistências dos concretos com o pó de FEA e sem, percebeu-se pouca variação, especialmente aos 90 dias de cura onde todos apresentaram valores entre 44 e 50 MPa. Os autores explicam que o atraso no tempo de pega dos concretos com a incorporação do Pó de FEA não interferiu no desenvolvimento da resistência mecânica, uma vez que as resistências à compressão

dos concretos com a incorporação do resíduo foram superiores àsquelas dos concretos sem o resíduo para o ensaio com 3 dias. Deve ser considerado também o baixo percentual de substituição do resíduo nos concretos (2%) e o baixo conteúdo de zinco da amostra – 10,7% (MASLEHUDDIN et al., 2011).

Por fim, foi notado que a incorporação do resíduo aumentou a trabalhabilidade dos três tipos de concretos produzidos. Esta propriedade foi avaliada em intervalos regulares entre 0 e 250 minutos e, para todos eles, foi verificado maior abatimento dos concretos com a incorporação do resíduo (MASLEHUDDIN et al., 2011).

Esta melhora na trabalhabilidade relatada pode ser atribuída à morfologia que os grãos do resíduo apresentam. Machado et al. (2006) realizaram ensaios de microscopia eletrônica de varredura neste resíduo identificando grãos com formatos esféricos. Além disso, os grãos se apresentam em forma de aglomerados de partículas finas cobrindo partículas maiores (STATHOPOULOS et al., 2013; SOFILIC et al., 2004), como pode ser verificado na Figura 9. Esta morfologia proporciona um efeito de rolamento no concreto, contribuindo na trabalhabilidade (MANTOVANI; KULAKOWSKI; MORAES, 2014).

Figura 9 - Microscopia eletrônica de varredura das partículas do Pó de FEA, com aumento de 7500x.
(a) (b)



Fonte: (a) Machado et al. (2006) (b) Lin et al. (2017)

Confirmando o exposto acima, Vargas, Masuero e Vilela (2004) notaram que, mantendo fixa a quantidade de cimento, a medida em houve acréscimo de incorporação do resíduo, foi necessária menor quantidade de água para alcançar uma mesma consistência normal das pastas produzidas. Os autores explicam que ao contrário do que ocorre com outras adições, onde quanto mais fina, maior a

necessidade de água para alcançar certa trabalhabilidade, quando se utiliza o pó de FEA, sua elevada densidade desloca parte da água presente entre os grãos floculados de cimento, aumentando, então, a quantidade de água disponível para fluidificar o concreto. Aliado a isso, os autores também citam o formato esférico dos grãos do resíduo que proporcionam um efeito rolamento na matriz produzida.

Fares et al. (2016) avaliaram a resistência à compressão de argamassas produzidas com a substituição de pó de FEA em um teor de 3%, com duas relações a/c: 0,4 e 0,5, sendo que na mistura de relação a/c 0,4 foi utilizado aditivo superplastificante. As idades de ensaio foram de 1, 3, 7, 28 e 90 dias, sendo que o dia 1 não foi realizado uma vez que a pega das misturas ainda não havia finalizado. Nas misturas com relação a/c de 0,4 houve um ligeiro decréscimo dos valores (aproximadamente 11% menor do que a mistura de referência) e os autores atribuíram o resultado à concentração elevada de zinco que formam o hidrozincato de cálcio (C – Z – H), com uma estrutura semelhante à do C – S – H, porém de menor resistência. Já nas misturas com relação a/c 0,5 houve aumento da resistência à compressão nas idades de 7, 28 e 90 dias e os autores atribuem à formação de um outro composto hemimorfita, o Z – S – H ($Zn_4(Si_2O_7)(OH)_2 \cdot H_2O$), que possui propriedades melhoradas em relação ao C – S - H.

Um estudo desenvolvido por Alizadeh e Momeni (2016) avaliou a influência da substituição de amostras de Pó de FEA em porcentagens de 0%, 5% e 10% em relação à massa de cimento. As amostras divergiam na quantidade de zinco: a amostra 1 possuía uma quantidade de 9,7% de zinco enquanto a amostra 2 possuía apenas 1,5%. Os autores ensaiaram as amostras com 1, 7 e 28 dias, sendo que o ganho de resistência à compressão foi identificado aos 7 e 28 dias para as duas amostras. Os autores explicam que mesmo no caso da amostra 2, com baixo conteúdo de zinco, a elevada finura do Pó de FEA leva a um aumento das ligações entre o cimento e o resíduo levando a melhores resultados mecânicos.

A resistência mecânica dos concretos com o Pó de FEA foi atestada em uma pesquisa que realizou adições de 5%, 10% e 15% do resíduo. Foi identificado aumento de resistência à compressão ao passo em que aumentou o teor empregado, alcançando incrementos de até 35,7%, 32% e 20,5% nas idades de 7, 28 e 90 dias, respectivamente. A resistência à flexão foi analisada somente aos 28 dias e, apesar de os valores terem diminuído ao passo em que se deu a adição do resíduo, todos os

3 teores apresentaram valores superiores à referência. Os autores sinalizam um desempenho do resíduo semelhante ao de nanopartículas que preenchem os vazios da matriz cimentícia e aumentam a compacidade e rigidez do concreto e ainda indicam seu uso em concretos de alto ou ultra alto desempenho (RUBIO-CINTAS et al., 2019).

Outros estudos envolvem o uso combinado do resíduo e de aditivos aceleradores de pega de modo a neutralizar o impacto do teor de óxido de zinco no tempo de pega e verificar o comportamento dos concretos nessas condições. Os testes foram feitos com 4%, 8% e 12% de substituição do cimento pelo resíduo em misturas com e sem o uso de aditivos e os ensaios foram feitos com 1, 7 e 28 dias sendo que as misturas que não receberam o aditivo não puderam ser ensaiadas com 1 dia. Como resultado, os autores concluíram que o concreto com 4% de substituição de cimento por resíduo e 4% de aditivo acelerador foi o que proporcionou os melhores resultados mecânicos nas 3 idades avaliadas (FARES et al. 2021).

Por fim, diante de todas as pesquisas analisadas, pode-se esperar que, embora as resistências mecânicas possam ser menores nas idades iniciais, por razão do atraso na hidratação que este resíduo causa, para maiores idades, espera-se que elas apresentem maiores valores quando comparadas às amostras de referência, uma vez que a hidratação é reestabelecida e novos compostos podem ser formados. Entretanto, tanto as propriedades mecânicas - as resistências à compressão e à tração, quanto propriedades físicas de tempo de pega e trabalhabilidade, por exemplo, dependerão de uma série de fatores como o teor de adição ou substituição utilizado, a composição química do resíduo empregado, a finura e massa específica que eles apresentam e até o pH que eles possuem.

Além disso, apesar de existir consenso a respeito da alteração da reação química padrão das matrizes cimentícias, não há um perfeito entendimento de como de fato ocorrem estas reações por completo, especialmente como ficam os compostos depois de hidratados, com idades mais avançadas.

O uso do Pó de FEA em matrizes de cimento se torna ainda mais interessante considerando a possibilidade de aliar um bom desempenho mecânico à capacidade de aproveitamento de um resíduo com alto teor de metais pesados oferecendo um destino diferente do aterro industrial, garantindo que sua reutilização não ofereça risco à sociedade (RUBIO-CINTAS, et al. 2019)

3.1.2 Terra de Shredder

A terra de Shredder é um material fortemente heterogêneo, pois sua composição é dependente do tipo de sucata recebida para reciclagem. Por esta razão, sua caracterização química, física, mineralógica e ambiental pode variar consideravelmente de uma planta para outra ou até em diferentes intervalos de coleta, dificultando a existência de um padrão de composição do material. Em termos de aplicação em matrizes de cimento, algumas pesquisas no Brasil trabalham com o resíduo como substituição aos agregados.

Um estudo buscou empregar o resíduo como substituição ao agregado miúdo em peças de concreto para pavimentação. Primeiramente foram testados incrementos de 5% de substituição da areia pelo resíduo até o teor máximo de 20% em corpos-de-prova de concreto 10x20 cm para verificação da resistência e determinação do teor que seria empregado nas peças de pavimentação. Neste primeiro teste, a medida em aumentava a porcentagem de substituição, a resistência mecânica diminuía, porém como a mistura com 20% de substituição apresentou resistência superior à 35 MPa que é o estabelecido pela NBR 9781 (ABNT, 2013) este foi o teor escolhido para confecção das peças de concreto para pavimentação (CAETANO, 2016).

Ainda nesta pesquisa, depois dos blocos confeccionados, estes foram ensaiados aos 28 dias e a resistência encontrada foi de 34,1 MPa, ligeiramente abaixo do que é estabelecido pela NBR 9781 (ABNT, 2013), de 35 MPa. Por fim, foi verificada a atividade pozolânica do resíduo com o cimento, de acordo com as orientações da NBR 5752 (ABNT, 2014), encontrando o valor de 30%, inferior ao exigido pela norma.

Internacionalmente alguns estudos também caminham para o aproveitamento como agregados, porém com uma sequência de tratamentos térmico e químico. O tratamento térmico envolveu a calcinação do resíduo a 700°C por 5 horas para eliminação da matéria orgânica. Em seguida, três tipos de tratamento químico foram investigados: a imersão do resíduo em hidróxido de sódio, outro em ácido sulfúrico e o último nos dois compostos: primeiro imerso em hidróxido de sódio, seguido de lavagem e depois imerso em ácido sulfúrico (PÉRA; AMBROISE; CHABANNET, 2004).

Após oito horas de imersão, o resíduo foi substituído pela areia, em matrizes de argamassa, nos teores de 100%, 50% e 30% nos três tipos de tratamento químico

para verificar a viabilidade de emprego futuro em matrizes de concreto. A partir dos ensaios de tempo de pega e resistência à compressão os autores constataram que o resíduo tratado quimicamente pode ser usado como substituição à areia em teores de até 50%, especialmente quando o último tratamento químico foi empregado (PÉRA; AMBROISE; CHABANNET, 2004).

Apesar do fato de que a maioria das pesquisas giram em torno do uso do resíduo como agregado, em um estudo realizado por Batista (2014), onde foi feita a caracterização completa da Terra de Shredder, foi verificado que o resíduo apresenta grande heterogeneidade, mas também possui alta concentração de minerais e, de maneira geral, é composto por areia, silte e argila. Além disso, como é um resíduo classificado como não perigoso, mais aplicações na construção civil devem ser buscadas, com a devida verificação do impacto ambiental.

3.2 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Diante do exposto no capítulo, busca-se verificar a viabilidade de aplicação dos resíduos como um material de granulometria fina em adição ao concreto. Essa verificação será feita por meio da avaliação do comportamento mecânico e ambiental dos concretos produzidos e a metodologia adotada é apresentada no capítulo seguinte.

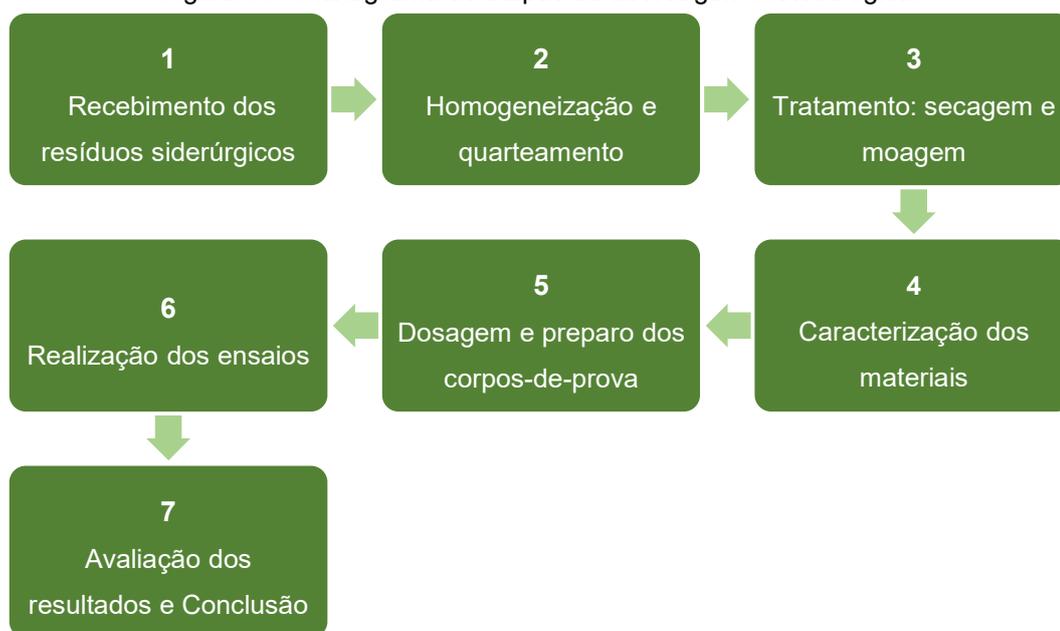
Para o pó de FEA, alguns comportamentos são esperados, como o atraso no tempo de endurecimento, mas, apesar disso, também se aposta na hipótese de contribuição à resistência à compressão e à tração, especialmente pela elevada finura que o material apresenta e também por um consumo do hidróxido de cálcio da pasta de cimento, formando novas fases hidratadas. Em relação à Terra de Shredder, como não existem pesquisas que tenham avaliado o material com granulometria semelhante ao cimento, em matrizes de concreto, este trabalho servirá como suporte para o progresso dos estudos.

4 ABORDAGEM METODOLÓGICA

A abordagem metodológica adotada nesta pesquisa será conduzida conforme apresenta a Figura 10. Além disso, é fundamental considerar a etapa de revisão bibliográfica ocorrendo em paralelo com todas as outras apresentadas.

A etapa de revisão bibliográfica é responsável por fornecer suporte para a tomada de decisões por meio da análise do estado atual de conhecimento e informação sobre o problema de pesquisa. Ela foi realizada buscando artigos nacionais e internacionais, obtidos principalmente pelo portal de periódicos da CAPES (Coordenação de aperfeiçoamento de pessoal de nível superior) bem como em congressos nacionais e internacionais realizados com foco no tema abordado. Por fim, dissertações de mestrado e teses de doutorado também são responsáveis por apoiar essa etapa.

Figura 10 - Fluxograma de etapas da abordagem metodológica.



Fonte: A autora.

Como se trata de uma pesquisa experimental, a primeira etapa envolve o recebimento dos resíduos, que são provenientes da empresa ArcelorMittal, planta de Piracicaba-SP. Os resíduos foram coletados segundo a NBR 10.007 – Amostragem de Resíduos Sólidos (ABNT, 2004d) e, assim que recebidos, foram armazenados no Laboratório de Ensaio e Materiais de Construção (LEMAC) em Vitória – ES, para então serem homogeneizados e quarteados de acordo com a NBR NM 27 – Agregados – Redução da amostra de campo para ensaios em laboratório (ABNT, 2001), separando a parte necessária para realização da caracterização e dos ensaios. Essa fração separada

para estudo foi seca em estufa a 100°C até obtenção de massa constante. A Figura 11 apresenta os dois resíduos recebidos.

Figura 11 – Recebimento dos resíduos no laboratório (a) e homogeneização e quarteamento (b).



(a)



(b)

Fonte: A autora.

4.1 PLANEJAMENTO DOS EXPERIMENTOS

Em uma pesquisa experimental, as variáveis que compõem o programa de experimentos podem ser classificadas como: de controle, independentes e dependentes. As variáveis de controle devem permanecer constantes durante todas as etapas do experimento, pois elas podem provocar variações significativas sobre as variáveis de interesse. As independentes são determinadas pelo pesquisador de maneira intencional, de modo a verificar a relação entre as variações determinadas com as outras variáveis. Já as variáveis dependentes (variáveis resposta) são as que serão avaliadas nos ensaios, sendo que seus efeitos estão diretamente relacionados com as outras variáveis do programa. No Quadro 1 abaixo, estão listadas as variáveis envolvidas na pesquisa.

Quadro 1- Variáveis utilizadas na pesquisa

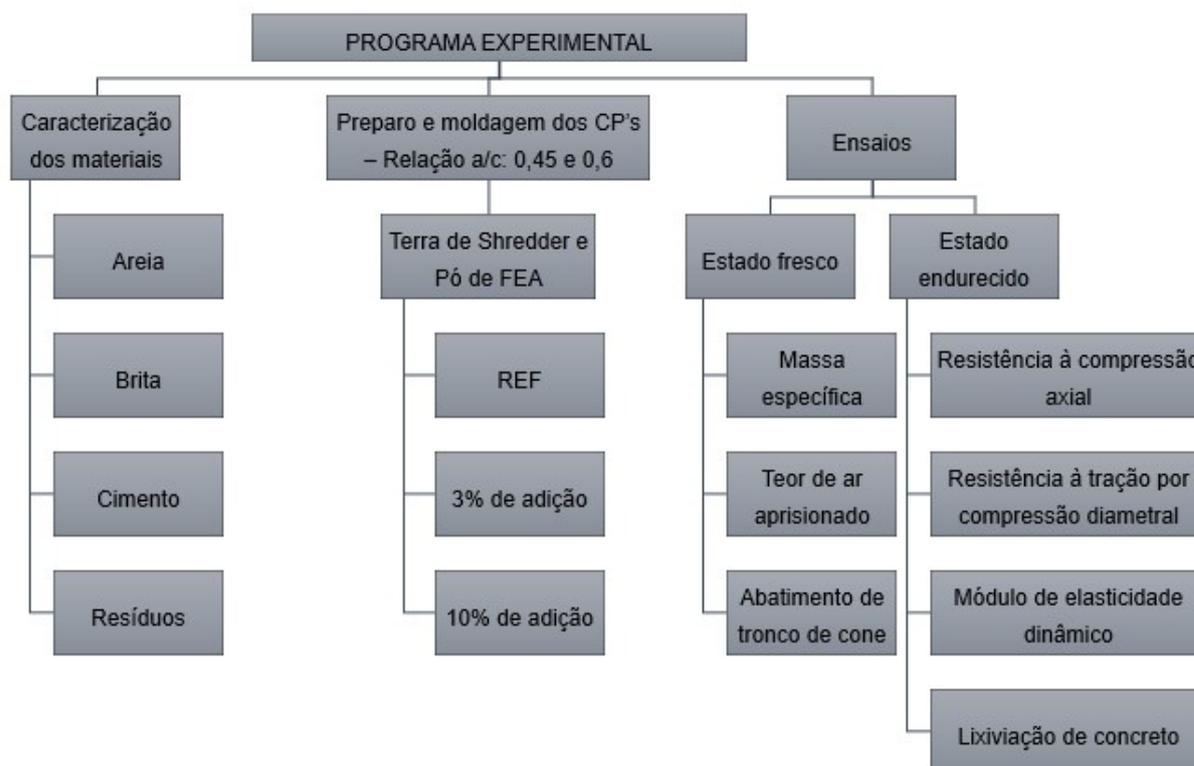
CLASSIFICAÇÃO	VARIÁVEIS	QUANT.
DE CONTROLE	Resíduos utilizados	7
	Tipo de cimento (CP V - ARI)	
	Agregado miúdo	
	Agregado graúdo	
	Método de dosagem	
	Tipo de cura	
	Equipamento utilizado para ensaios mecânicos	
INDEPENDENTES	Porcentagem de adição dos resíduos	3
	Relações a/c adotadas	
	Idades	
DEPENDENTES (RESPOSTA)	Caracterização dos resíduos	7
	Índice de consistência pelo abatimento de tronco de cone	
	Massa específica e teor de ar aprisionado	
	Resistência à compressão axial	
	Resistência à tração por compressão diametral	
	Módulo de elasticidade dinâmico	
	Lixiviação do concreto	

Fonte: A autora.

4.2 PROGRAMA EXPERIMENTAL

O programa experimental tem como função indicar como serão atendidos os objetivos indicados na pesquisa por meio da determinação dos ensaios a serem realizados. Para isso, ele foi dividido em três grandes etapas conforme indica a Figura 12.

Figura 12 - Programa experimental.



Fonte: A autora.

Primeiramente, a Terra de Shredder passou por um beneficiamento inicial de modo a alcançar finura semelhante às adições minerais. Após esta etapa eles passaram pelo processo de caracterização física, química, mineralógica, microestrutural e ambiental. Em seguida, foi feita a preparação e moldagem dos corpos de prova que envolveu atividades de dosagem do concreto e posterior concretagem e preparo dos corpos de prova, onde foi determinado o uso das relações água/cimento e as porcentagens de adição de resíduo. Estes parâmetros foram decididos com base na revisão bibliográfica de cada resíduo utilizado.

Por meio deste programa experimental, espera-se avaliar o comportamento mecânico e ambiental do concreto com diferentes relações água/aglomerante e também diferentes percentuais de incorporação de resíduos. Para isso, os experimentos serão executados conforme as normas brasileiras da ABNT.

4.2.1 Matriz de experimentos

A matriz de experimentos é apresentada no Quadro 2. Nela são determinados os níveis de cada variável da pesquisa, bem como o total de corpos de prova confeccionados. Para verificação da influência do teor de água no concreto, foi

determinado o uso de duas relações a/c, que são 0,45 e 0,60 que, de acordo com a NBR 6118 – Projeto de estruturas de concreto - Procedimento, é o limite máximo para locais que possuam classe de agressividade IV e II, respectivamente, para estruturas em concreto armado (ABNT, 2014).

Em relação às idades escolhidas, as avaliações mecânicas foram iniciadas aos 7 dias, avançando para 28 e 91 dias. As idades foram escolhidas considerando que o Pó de FEA promove um atraso no tempo de hidratação quando inserido em matrizes cimentícias e, assim, é possível acompanhar a influência da hidratação do concreto na resistência mecânica apresentada. Por fim, a avaliação ambiental foi feita aos 120 dias por meio do ensaio de lixiviação dos corpos de prova.

Já para os níveis de utilização do resíduo, deve-se considerar que a pesquisa aborda o comportamento dos concretos frente ao uso dos resíduos como adição. Para o pó de FEA, como sabe-se que há um considerável atraso no tempo de pega atribuído à presença de metais pesados conforme apresenta a revisão bibliográfica, o conteúdo máximo de adição deste resíduo deve ser pensado como base no conteúdo total de zinco presente na amostra (MAGALHÃES, 2017). Considerando que a amostra estudada possui em torno de 19% deste metal, os teores de adição adotados foram 3% e 10% em relação à massa de cimento. Para a Terra de Shredder, optou-se por utilizar as mesmas porcentagens do pó de FEA por se tratar de um material pouco abordado no uso em concretos como adição.

Quadro 2 - Matriz experimental do Pó de FEA e da Terra de Shredder.

Resíduo	Variáveis independentes						Variáveis dependentes			Quantidade total de verificações
	Níveis de relação a/c		Níveis de utilização de resíduo		Níveis de idades		Quant. de CP	Quais		
	Níveis	Quais	Níveis	Quais	Níveis	Quais				
Pó de FEA	2	0,45; 0,60	3	0%; 3%; 10%	3	7d; 28d; 91d	5	Resistência a compressão axial	90	
	2	0,45; 0,60	3	0%; 3%; 10%	3	7d; 28d; 91d	4	Resistência a tração por compressão diametral		
	2	0,45; 0,60	3	0%; 3%; 10%	3	7d; 28d; 91d	-	Módulo de elasticidade	72	
	2	0,45; 0,60	3	0%; 3%; 10%	1	120d	-	Lixiviação		
Terra de Shredder	2	0,45; 0,60	2	3%; 10%	3	7d; 28d; 91d	5	Resistência a compressão axial	60	
	2	0,45; 0,60	2	3%; 10%	3	7d; 28d; 91d	4	Resistência a tração por compressão diametral		
	2	0,45; 0,60	2	3%; 10%	3	7d; 28d; 91d	-	Módulo de elasticidade	48	
	2	0,45; 0,60	2	3%; 10%	1	120d	-	Lixiviação		
TOTAL DE CORPOS-DE-PROVA										
									270	

Fonte: A autora.

É importante esclarecer que os corpos de prova de referência foram contabilizados apenas uma vez, dentro da matriz do Pó de FEA totalizando 03 níveis de adição de resíduo, enquanto a Terra de Shredder possui dois níveis, entretanto a referência será parâmetro de comparação para os dois resíduos da pesquisa.

Foram considerados cinco corpos de prova para o ensaio de resistência à compressão axial e quatro para o ensaio de resistência à tração na compressão diametral, suficientes para realização do tratamento estatístico adequado. O ensaio de módulo de elasticidade foi realizado nos mesmos corpos de prova dos ensaios mecânicos, porém antes do rompimento, por meio de um ensaio não destrutivo de velocidade de propagação ultrassônica. Por fim, o ensaio ambiental foi realizado com os corpos-de-prova do ensaio de resistência a tração, após o rompimento. Com isso são totalizados 270 corpos de prova para a realização da pesquisa.

4.2.2 Nomenclatura das misturas

Considerando que a matriz de experimentos possui 10 misturas diferentes, é estabelecido um modelo para nomenclatura de cada uma de modo que seja possível e rápida a identificação de qual resíduo se trata, bem como a porcentagem utilizada e a relação água/cimento adotada. Esse modelo é indicado na Figura 13.

Figura 13 - Esquema de nomenclatura das misturas.



Fonte: A autora.

Seguindo as orientações da Figura 13, o Quadro 3 indica o nome de todas as misturas desenvolvidas na pesquisa, bem como as duas de referência utilizadas como parâmetro de comparação.

Quadro 3 - Sigla das misturas desenvolvidas na pesquisa.

NOMENCLATURA	RESÍDUO UTILIZADO	PORCENTAGEM DE ADIÇÃO	RELAÇÃO ÁGUA/CIMENTO
REF/45	-	-	0,45
REF/60	-	-	0,60
PO03/45	Pó do despoeiramento do forno elétrico a arco (PO)	3%	0,45
PO10/45		10%	
PO03/60		3%	0,60
PO10/60		10%	
TS03/45	Terra de Shredder (TS)	3%	0,45
TS10/45		10%	
TS03/60		3%	0,60
TS10/60		10%	

Fonte: A autora.

4.3 MATERIAIS

Os materiais necessários para a realização desta pesquisa são provenientes da região da Grande Vitória no que se refere ao cimento Portland, os agregados e a água. Em relação aos resíduos, eles são provenientes da usina siderúrgica de Piracicaba – SP. A seguir, será detalhada a caracterização de cada um deles.

4.3.1 Cimento Portland

O cimento Portland foi escolhido buscando eliminar o efeito combinado dos resíduos com as possíveis adições minerais presentes na sua composição. Com isso, foi determinado o uso do CP V – ARI por ser o cimento comercialmente disponível com o menor teor de adições minerais, evitando possíveis interações entre esses dois compostos. De acordo com a NBR 16697 – Cimento Portland – Requisitos (ABNT, 2018), o cimento Portland de alta resistência inicial pode receber o máximo 10% de material carbonático como adição mineral. As propriedades físicas, químicas e mecânicas foram fornecidas pelo fabricante e são apresentadas na Tabela 5.

Tabela 5 - Caracterização do CP V – ARI.

Propriedade		Método de ensaio	Limites NBR 16697 (ABNT, 2018)	Resultados
Massa específica (g/cm ³)		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 nº 200 (%)	NBR 11579 (ABNT, 2012)	≤ 6	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	23,48
	3 dias (MPa)		≥ 24	33,93
	7 dias (MPa)		≥ 34	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 (%)	ABNT NBR NM 15: 2012	≤ 3,5	1,06

Fonte: Fornecido pelo fabricante (2021).

4.3.2 Agregado miúdo

O agregado miúdo utilizado na pesquisa é proveniente de jazida e passou pelo processo de peneiramento e secagem, para retirada de impurezas e umidade. Sua caracterização física é apresentada na Tabela 6.

Tabela 6 - Caracterização do agregado miúdo.

Propriedade	Método de ensaio	Resultados
Dimensão máxima característica (mm)	NBR NM 248 (ABNT, 2012)	2,36
Módulo de finura	NBR NM 248 (ABNT, 2012)	1,77
Massa específica (g/cm ³)	NBR NM 52 (ABNT, 2009)	2,64
Massa unitária (k/m ³)	NBR NM 45 (ABNT, 2006)	1785,26
Volume de vazios (%)	NBR NM 45 (ABNT, 2006)	32,3
Material pulverulento (%)	NBR NM 46 (ABNT, 2003)	10,74
Impurezas orgânicas	NBR NM 49 (ABNT, 2001)	Mais escura
Teor de argila e materiais friáveis (%)	NBR 7218 (ABNT, 2010)	0,55

Fonte: A autora.

4.3.3 Agregado graúdo

O agregado graúdo é proveniente da britagem de rochas graníticas. Ele foi lavado para remoção de finos e impurezas, e seco ao ar. Sua caracterização física é apresentada na Tabela 7.

Tabela 7 - Caracterização do agregado graúdo.

Propriedade	Método de ensaio	Resultados
Dimensão máxima característica (mm)	NBR NM 248 (ABNT, 2012)	19
Módulo de finura	NBR NM 248 (ABNT, 2012)	2,94
Massa específica (g/cm ³)	NBR NM 53 (ABNT, 2009)	2,78
Massa unitária (kg/m ³)	NBR NM 45 (ABNT, 2006)	1605,31

Fonte: A autora.

4.3.4 Água

A água utilizada é fornecida pela rede de abastecimento da cidade de Vitória/ES (CESAN), em condições de potabilidade. De acordo com a NBR 15900-1 – Água para amassamento do concreto. Parte 1 – Requisitos (ABNT, 2009), não é necessário a realização de ensaios de caracterização, pois, por ser proveniente de abastecimento público, entende-se que ela é adequada para uso em concreto.

4.3.5 Resíduos siderúrgicos

Como o objetivo deste projeto é avaliar a influência do uso dos resíduos siderúrgicos como adição mineral ao concreto de cimento Portland por meio de suas propriedades mecânicas, eles devem apresentar granulometria adequada ao emprego com este papel e para atingir este objetivo a Terra de Shredder passou por um processo de beneficiamento. Como parâmetro de aceitação, o resíduo precisa apresentar finura semelhante ou superior à do cimento Portland e foi utilizada a recomendação descrita

na NBR 12653 – Materiais Pozolânicos – Requisitos (ABNT, 2014b) que estabelece uma quantidade de material retido menor ou igual a 20% na peneira de abertura de malha de 45 μ m. Os processos necessários para alcançar o parâmetro estabelecido envolveram etapas de peneiramento e moagem no moinho de bolas, identificado na Figura 14.

Figura 14 - Moinho de Bolas (a) e as esferas utilizadas (b).



Fonte: A autora.

Por se tratar de um material de grande heterogeneidade, a Terra de Shredder passou por uma etapa de peneiramento inicialmente, onde apenas a fração passante na peneira de 6,3 mm foi utilizada na pesquisa. Após esta etapa, o material foi encaminhado ao moinho de bolas onde permaneceu por um período de 2 ciclos (5 horas e 34 minutos). Em seguida, como ainda foram constatados pequenos fragmentos do resíduo que não foram moídos pelo moinho, o resíduo foi novamente peneirado, agora na peneira de 1,18 mm, para que esses pedaços fossem retirados. Por fim, o pó de FEA não passou por nenhum beneficiamento por se encontrar já em uma finura muito elevada, dispensando atividades de peneiramento e moagem. A indicação dos processos e os parâmetros utilizados estão detalhados no Quadro 4.

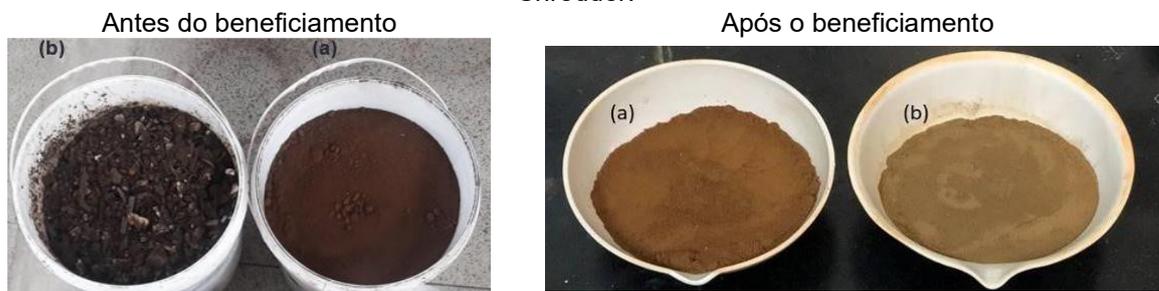
Quadro 4 - Beneficiamento realizado em cada resíduo

Resíduo	Processo	Tempo de moagem	Parâmetro
Terra de Shredder	1 - Peneiramento	-	Utilizado o material passante na peneira 6,3 mm
	2 - Moagem no moinho de bolas	2 ciclos (5 horas e 34 minutos)	≤ 20% retido na peneira de 45µm
	3 - Peneiramento	-	Material moído peneirado na peneira de 1,18 mm
Pó de FEA	Nenhum	-	≤ 20% retido na peneira de 45µm

Fonte: A autora.

Os resíduos antes e depois do beneficiamento são apresentados na Figura 15. O Pó de FEA não passou por nenhum tipo de beneficiamento, somente a secagem em estufa para eliminação da umidade presente, a qual também foi submetida a Terra de Shredder, uma vez que as amostras chegaram ao laboratório com umidade muito elevada.

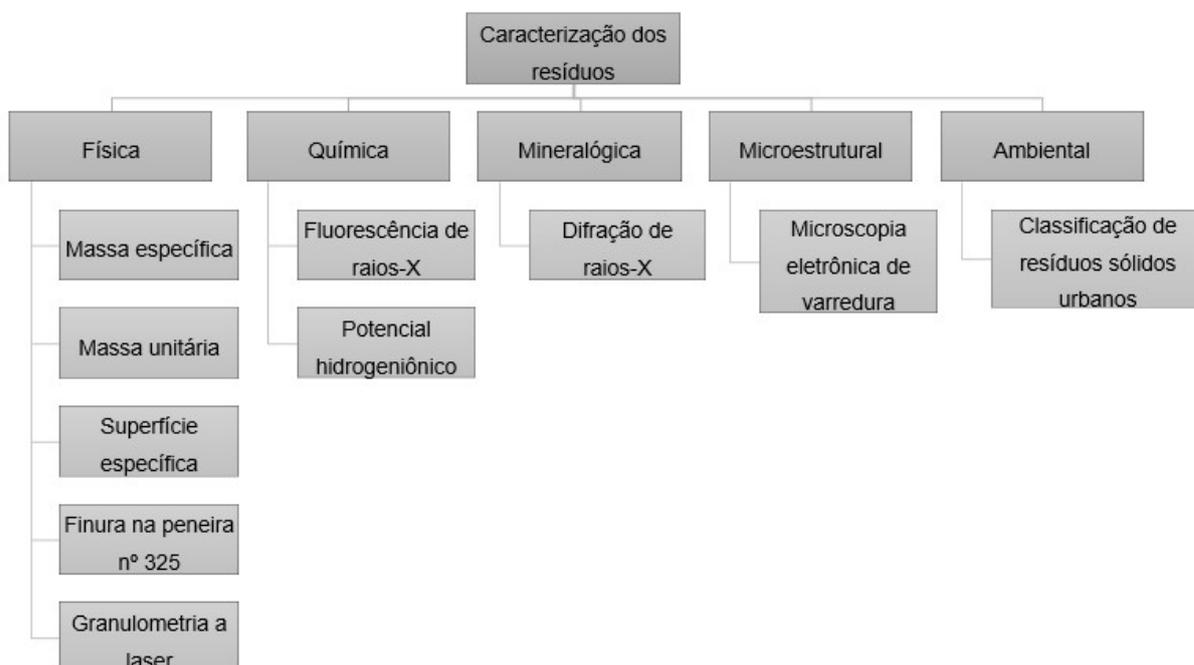
Figura 15 - Resíduos antes e depois do processo de beneficiamento. (a) Pó de FEA e (b) Terra de Shredder.



Fonte: A autora.

Uma vez que os dois resíduos apresentam granulometria esperada, será realizada a etapa de caracterização, que deve contemplar aspectos físicos, químicos, mineralógicos, microestruturais e ambientais de cada resíduo estudado na pesquisa, conforme apresenta a Figura 16.

Figura 16 - Organograma da caracterização dos resíduos siderúrgicos.



Fonte: A autora.

Na Tabela 8 estão indicadas todas as normas utilizadas para a realização dos ensaios descritos na Figura 16.

Tabela 8 - Métodos utilizados para realização da caracterização dos resíduos

Caracterização	Ensaio	Norma
Caracterização física	Massa específica	NBR 16605 (ABNT, 2017)
	Massa unitária	NBR 12127 (ABNT, 2019)
	Superfície específica	NBR 16372 (ABNT, 2015)
	Finura na peneira #325	NBR 15894-3 (ABNT, 2015)
	Granulometria a laser	VER ITEM 5.3.4.1
Caracterização química	Fluorescência de raios-X	NBR 14656 (ABNT, 2001)
	Potencial hidrogeniônico	4500 HB (APHA, 2005)
Caracterização mineralógica	Difração de raios-X	VER ITEM 5.3.4.3
Caracterização microestrutural	Microscópio eletrônico de varredura	VER ITEM 5.3.4.4
Caracterização ambiental	Classificação de resíduos sólidos urbanos	NBR 10.004 (ABNT, 2004a)

Fonte: A autora.

4.3.5.1 Caracterização física

Todos os ensaios de caracterização física foram realizados no LEMAC, com exceção única do ensaio de granulometria a laser que foi realizado no Centro de Tecnologia Mineral (CETEM). O ensaio de massa específica foi realizado de acordo com a NBR 16605 – Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da massa específica (ABNT, 2017), já o ensaio de massa unitária foi feito seguindo as recomendações da NBR 12127 – Gesso para construção civil – Determinação das propriedades físicas do pó (ABNT, 2019).

A superfície específica foi realizada de acordo com a NBR 16372 – Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da finura pelo método de permeabilidade ao ar (método Blaine) (ABNT, 2015), já a finura na peneira #325 foi feita por um método de lavagem com auxílio de um dispersante, de modo a separar ao máximo todas as partículas, garantindo a confiabilidade do ensaio, e foi seguida as orientações da NBR 15894-3 – Metacaulim para uso com cimento Portland em concreto, argamassa e pasta. Parte 3 – Determinação da finura por meio da peneira 45 μ m (ABNT, 2010).

Por fim, a granulometria a laser foi feita com o granulômetro Mastersizer 2000 – Malvern, no Laboratório Multiusuário de Caracterização Tecnológica do Centro de Tecnologia Mineral (CETEM). Com esta técnica é possível obter a curva granulométrica do resíduo que fornece, de maneira mais precisa, o tamanho das partículas dos resíduos, confirmando os resultados encontrados nos outros ensaios de finura.

A caracterização física dos resíduos e do cimento contribui para verificar proximidade entre esses materiais utilizados e também fornece suporte para completo entendimento do comportamento dos concretos com eles incorporados, tanto no estado fresco quanto endurecido.

4.3.5.2 Caracterização química

A caracterização química dos resíduos envolve ensaios de fluorescência de raios-X (FRX) e potencial hidrogeniônico. O FRX é uma técnica quali-quantitativa de avaliação de espécies químicas fundamental para se investigar a composição química dos resíduos, apresentada em forma de óxidos. Esse ensaio foi realizado no laboratório do CETEM com o espectrômetro por fluorescência de raios-X, modelo AxiosMax (Panalytical). O preparo de amostras envolve a etapa de secagem dos resíduos em

estufa a 100°C por 24 horas e, em seguida, eles foram passados na peneira de 63µm. Neste mesmo ensaio de fluorescência de raios-X também é feito o ensaio de perda por calcinação, que é um indicativo do teor de matéria orgânica presente na amostra. O ensaio de potencial hidrogeniônico (pH) foi realizado no laboratório de caracterização de resíduos (LACAR), com a técnica informada no standard Methods, método 4500 – HB (APHA, 2005), com o auxílio do equipamento pHmetro marca KASVI, modelo K39-1014B. A avaliação do pH dos resíduos é fundamental para que se conheça o caráter ácido ou básico deles, que pode influenciar diretamente no pH do concreto que, por sua vez, impacta na capacidade de proteção às armaduras. O equipamento utilizado é apresentado na Figura 17.

Figura 17 - Equipamento utilizado no ensaio de potencial hidrogeniônico



Fonte: A autora.

4.3.5.3 Caracterização mineralógica

A caracterização mineralógica foi feita por meio da técnica de difração de raios-X (DRX) que consiste na análise de fases cristalinas e amorfas no material, bem como na identificação dos cristais presentes. Esta avaliação é fundamental para analisar a reatividade do material uma vez que materiais vítreos possuem grande energia interna, favorecendo a capacidade aglomerante (SILVA; BATTAGIN; GOMES, 2017). Além disso, o ensaio fornece, caso a estrutura se apresente cristalina, quais cristais predominam na composição do resíduo, apresentando de que forma os constituintes vistos no ensaio de FRX se apresentam no resíduo.

O preparo de amostras envolve a etapa de secagem dos resíduos em estufa a 100°C por 24 horas e, em seguida, eles foram passados na peneira de 63µm pois somente o material passante nesta abertura seria utilizado para o ensaio. O ensaio foi realizado

no Laboratório Multiusuário de Caracterização Tecnológica do CETEM, por meio de um difratômetro da marca Bruker-AXS D4 Endeavour.

4.3.5.4 Caracterização microestrutural

A microestrutura dos resíduos foi avaliada com o apoio do microscópio eletrônico de varredura (MEV) de modo a identificar a morfologia dos compostos. Esta avaliação de como se apresenta a estrutura dos grãos é muito importante pois tem forte relação com o consumo de água, trabalhabilidade e o desenvolvimento de resistência do concreto (FONSECA, 2010). O equipamento adotado é da marca Zeiss, modelo EVO MA 10 e o metalizador é da marca Quorum, modelo Q150R ES, conforme indica a Figura 18. O ensaio foi realizado no Laboratório de Microscopia Eletrônica e Microanálise do IFES, Campus Vitória. A amostra foi preparada, primeiramente, secando-a em estufa à 100°C por 24 horas, e, em seguida, passando o resíduo na peneira de 75µm.

Figura 18 - Microscópio eletrônico de varredura (a) e metalizador utilizado (b)



(a)



(b)

Fonte: A autora.

Junto à microscopia, aplica-se também a técnica de espectroscopia por energia dispersiva (EDS) que fornece a análise química elementar da amostra em determinado ponto ou região confirmando a composição química do material. Esta análise é feita pela comparação de riscas espectrais identificadas na amostra e comparadas com espectros de referência armazenados em biblioteca (ROSIGNOLO, 2003).

4.3.5.5 Caracterização ambiental

Os resíduos siderúrgicos, por razão do processo de fabricação do aço, podem conter em sua composição química a presença de metais pesados como cromo, chumbo e zinco, por exemplo. A classificação ambiental desses resíduos se faz fundamental para garantir sua correta destinação, evitando impactos negativos à saúde e ao meio ambiente. Essa classificação foi feita por meio da NBR 10.004 – Resíduos sólidos - Classificação (ABNT, 2004a) que estabelece limites de aceitação da concentração dos metais. Esta concentração é verificada seguindo os procedimentos de duas outras normas que são a NBR 10.005 (ABNT, 2004b) e 10.006 (ABNT, 2004c) dos extratos lixiviados e solubilizados dos resíduos. Assim, é possível classificar os resíduos como perigosos ou não perigosos, sendo que este último ainda pode ser inerte ou não inerte.

A caracterização ambiental se mostra ainda mais importante para os resíduos aqui estudados que, por serem procedentes do reaproveitamento de sucatas ferrosas, possuem sua composição heterogênea, com ampla possibilidade da presença de metais pesados.

4.4 MÉTODOS

Os métodos adotados para alcançar os objetivos desta pesquisa são descritos a seguir e envolvem atividades de dosagem de concretos para produção dos corpos de prova e avaliação das propriedades físicas, mecânicas e ambientais das misturas.

4.4.1 Dosagem e preparo dos concretos

A dosagem de concretos é uma ferramenta fundamental para alcançar a combinação correta dos materiais que o compõem de modo a se alcançar determinadas propriedades tanto no estado fresco quanto endurecido, além de contribuir para avaliação de custos do concreto produzido (MEHTA; MONTERO, 2014).

Para a pesquisa, foi determinado o método IPT/EPUSP de Helene e Terzian (1992) que correlaciona quatro variáveis: relação água/cimento, resistência à compressão, consumo de cimento e o traço, fornecendo três leis de comportamento. O método se resume na determinação de um abatimento alvo e, executando três concretagens de três traços diferentes (rico, intermediário e pobre em cimento) indicados na Tabela 9, é possível obter o diagrama, de onde são tirados os traços desejados para a pesquisa, para essa mesma família de materiais utilizado e mesmo abatimento.

Assim, feitas as três concretagens e extraídas todas as informações necessárias, foi elaborado o diagrama de dosagem considerado para as misturas da pesquisa. Na Figura 19 são apresentados alguns corpos-de-prova depois de retirados da cura e o diagrama é apresentado na Figura 20.

Tabela 9 - Determinação dos traços para elaboração do diagrama de dosagem

TRAÇOS	Traço			Quantidades (kg)			Água (kg)	Abat. (cm)	Consumo de cimento (kg/m ³)	a/c
	C	A	P	C	A	P				
1:6,5	1	2,9	3,6	6,94	20,14	25	4,28	9	291,22	0,62
1:5,0	1	2,12	2,88	8,68	18,40	25	4,30	9	366,24	0,50
1:3,5	1	1,34	2,16	11,57	15,51	25	4,95	9	484,33	0,43

C: cimento; A: areia; P: pedra

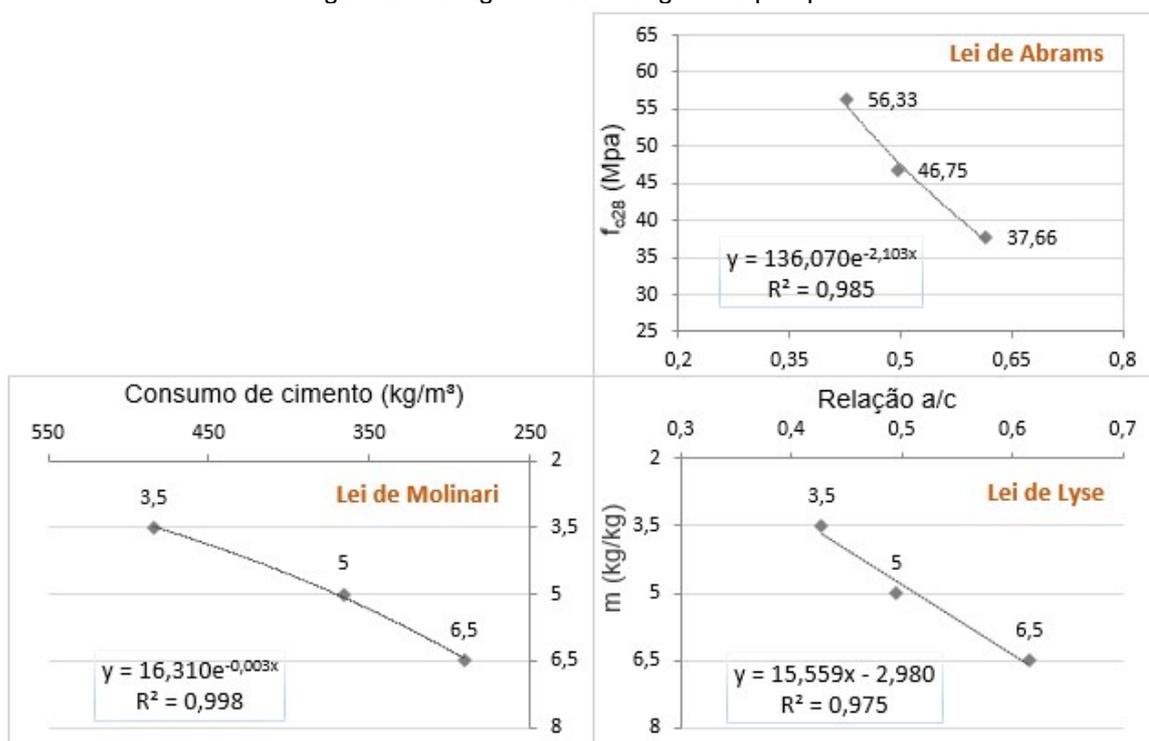
Fonte: A autora

Figura 19 - Corpos-de-prova depois de moldados e retirados da cura



Fonte: A autora.

Figura 20 - Diagrama de dosagem da pesquisa



Fonte: A autora

Por fim, de posse do diagrama de dosagem, foram extraídos os traços das misturas da pesquisa. A partir dos traços de referência (REF45 e REF60) foram adicionados percentuais de 3% e 10% dos resíduos em novas misturas, conforme apresenta a Tabela 10, totalizando a produção de 10 traços de concretos diferentes.

Tabela 10 - Traços unitários das misturas.

Traço	Cimento	Areia	Brita	Resíduo	Relação a/agl
REF45	1	1,61	2,41	0,00	0,45
PO03/45	1	1,61	2,41	0,03	
PO10/45	1	1,61	2,41	0,10	
TS03/45	1	1,61	2,41	0,03	
TS10/45	1	1,61	2,41	0,10	
REF60	1	2,82	3,53	0,00	0,60
PO03/60	1	2,82	3,53	0,03	
PO10/60	1	2,82	3,53	0,10	
TS03/60	1	2,82	3,53	0,03	
TS10/60	1	2,82	3,53	0,10	

Fonte: A autora.

4.4.2 Ensaios no estado fresco

As propriedades físicas avaliadas no estado fresco são a massa específica, o teor de ar aprisionado e a consistência, medida por meio do ensaio do abatimento de tronco de cone.

4.4.2.1 Massa específica e teor de ar aprisionado

A massa específica é definida como a massa do concreto por unidade de volume incluindo o volume de ar aprisionado e incorporado e é obtida por meio da NBR 9833 (ABNT, 2008). Na mesma norma é possível calcular o teor de ar presente na mistura, usando como dados o rendimento e o volume total de componentes na betonada, para cada mistura.

4.4.2.2 Consistência do concreto

A consistência do concreto é medida por meio do ensaio de abatimento de tronco de cone, conduzido pela NBR 16.889 (ABNT, 2020). Este ensaio está diretamente relacionado com a propriedade de trabalhabilidade do concreto e determina a facilidade que a mistura pode ser manipulada garantindo capacidade de lançamento sem a ocorrência de segregação dos materiais, de acordo com o tipo de construção, método de lançamento e adensamento adotado. Um dos fatores que afetam a trabalhabilidade é o uso de adições, que podem reduzir a exsudação e aumentar a coesão do concreto (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

4.4.3 Ensaios no estado endurecido

As propriedades avaliadas no estado endurecido são as de resistência à compressão e à tração e o módulo de elasticidade dinâmico. A resistência mecânica do concreto é o parâmetro mais especificado e valorizado por projetistas e engenheiros e o principal nas dosagens e controle de qualidade, especialmente a resistência à compressão. Além disso, diversas outras propriedades do concreto, como impermeabilidade e resistência a intempéries podem ser relacionadas com a resistência mecânica que ele apresenta (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

A participação dos finos na avaliação das propriedades mecânicas torna-se interessante quando se considera sua influência na otimização final das proporções, com capacidade de densificar a matriz de concreto preenchendo os poros e, por vezes, atuando quimicamente na formação de compostos hidratados aumentando a resistência à compressão e à tração deste material.

4.4.3.1 Resistência à compressão axial

A resistência à compressão axial do concreto é a propriedade mais importante em projetos de estruturas de concreto armado. Esta propriedade foi avaliada por meio da NBR 5739 (ABNT, 2018). De acordo com esta mesma norma, o valor de resistência à compressão é apresentado segundo a Equação 1.

$$f_c = \frac{4 * F}{\pi * D^2} \quad \text{Equação 1}$$

Onde:

f_c = Resistência à compressão, expressa em Megapascals (MPa)

F = Força máxima alcançada, expressa em Newtons (N)

D = Diâmetro do corpo de prova, expresso em milímetros (mm)

Os corpos de prova passaram pelo processo de retífica para que as duas bases ficassem com a superfície mais lisa possível e também respeitando a relação altura/diâmetro estabelecida pela norma, que deve estar entre 1,94 e 2,06 para que não precise aplicar nenhum fator de correção.

A execução do ensaio consiste na aplicação de uma carga na direção axial do corpo de prova, a uma velocidade constante, até que se alcance a ruptura, conforme indica a Figura 21. Foram feitos 5 corpos de prova para cada traço avaliado em 3 idades diferentes.

Figura 21 - Execução do ensaio de resistência à compressão



Fonte: A autora.

4.4.3.2 Resistência à tração por compressão diametral

Esta propriedade foi avaliada por meio da metodologia presente na NBR 7222 (ABNT, 2011) que descreve um método indireto na determinação da tração do concreto pelas forças de compressão aplicadas diametralmente que geram, ao longo deste diâmetro, tensões de tração uniformes e perpendiculares a ele, conforme indica a Figura 22. Esse método foi descrito por Carneiro (1943) e é atualmente empregado em nível mundial sendo conhecido como “*Brazilian Test*”. A fórmula que determina o valor da resistência à tração é apresentada na Equação 2.

$$f_{ct,sp} = \frac{2 * F}{\pi * d * l} \quad \text{Equação 2}$$

Onde:

$f_{ct,sp}$ = Resistência à tração por compressão diametral (MPa)

F = Força máxima obtida no ensaio (N)

d = Diâmetro do corpo de prova (mm)

l = Comprimento do corpo de prova (mm).

Figura 22 - Execução do ensaio de resistência à tração por compressão diametral



Fonte: A autora.

4.4.3.3 Módulo de elasticidade dinâmico

Em materiais heterogêneos como o concreto são vários os fatores que afetam seu comportamento elástico como sua densidade, o módulo elástico dos principais componentes (agregados e pasta de cimento) e a zona de transição, e todos esses fatores estão intimamente ligados a porosidade que eles apresentam, ao passo que

fases muito porosas perdem a capacidade de resistir às deformações. Para a matriz pasta de cimento o uso de materiais finos pode contribuir diretamente na redução da porosidade que elas apresentam, preenchendo os vazios e densificando a estrutura, já na zona de transição, eles podem reduzir a presença de microfissuras e vazios capilares (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

Para a determinação do módulo de elasticidade dinâmico, foi utilizado o método não destrutivo, valendo-se dos mesmos corpos de prova dos outros ensaios mecânicos. Para isso, foi utilizada uma correlação dessa propriedade com a velocidade de propagação ultrassônica. Essa correlação pode ser identificada na norma americana - ASTM C597 (ASTM, 2016) e também na norma britânica - BS 1881 – Part 203, especificadas para concreto. Além disso, há a norma brasileira – NBR 15630 (ABNT, 2009) que apresenta a mesma correlação presente nas duas outras normas, porém, aplicada em argamassas de assentamento e revestimento.

As três normas indicadas apresentam a mesma forma de obtenção do módulo de elasticidade, sendo que na norma brasileira e britânica é exposta segundo a Equação 3, enquanto na norma americana é indicada segundo a Equação 4.

$$E = \frac{V^2 * \rho * (1 + \mu) * (1 - (2 * \mu))}{1 - \mu} \quad \text{Equação 3}$$

$$V = \sqrt{\frac{E * (1 - \mu)}{\rho * (1 + \mu) * (1 - (2 * \mu))}} \quad \text{Equação 4}$$

Onde,

E = Módulo de elasticidade dinâmico (Pa)

V = Velocidade de propagação ultrassônica (m/s)

ρ = Massa específica (kg/m³)

μ = Coeficiente de Poisson

Para se obter o valor da velocidade de propagação ultrassônica, foi seguida a metodologia descrita na NBR 8802 (ABNT, 2019). Os nove corpos de prova foram retificados para que ficassem com as superfícies planas, lisas e limpas, conforme orienta a mesma norma. O ensaio foi feito por meio de transmissão direta, com os

transdutores posicionados na face oposta (Figura 23) e o cálculo da velocidade é feito de acordo com a Equação 5.

$$V = \frac{L}{t} \quad \text{Equação 5}$$

Entretanto, no equipamento utilizado, da marca Proceq, modelo Pundit Lab (Figura 23), antes do ensaio já é informado como dado inicial o comprimento do corpo de prova, logo, já é fornecido como valor resposta a velocidade de onda ultrassônica bem como o tempo gasto e a confiança da leitura.

A frequência utilizada foi de 54 Hz pois, de acordo com a Tabela C.1 da NBR 8802 (ABNT, 2019), pelas dimensões laterais do corpos-de-prova, é a mais indicada. Tal recomendação também consta na norma americana *American Concrete Institute* 228.2R. Foram utilizados pulsos de tensão de 500V, conforme recomenda a ASTM C597 (ASTM, 2016). Em relação à confiança das leituras, só foram consideradas leituras válidas aquelas que apresentassem valor igual ou superior a 75%, que é o que recomenda o manual do equipamento.

Figura 23 - Equipamento utilizado para obtenção da velocidade de propagação ultrassônica e posição dos transdutores.



Fonte: Godinho et al. (2018).

Alguns fatores podem interferir diretamente no resultado de velocidade de propagação ultrassônica do concreto, e um deles é a umidade presente no corpo de prova, ao passo que, de acordo com a ASTM C597 (ASTM, 2016) a velocidade de onda ultrassônica pode ser 5% mais alta no concreto saturado quando comparado com o concreto seco. Como esse ensaio foi realizado nos corpos de prova dos ensaios de

resistência à compressão e à tração, eles foram retirados da cura 24 horas antes desses ensaios para que ficassem esse período de tempo em estufa a 60°C (BENETTI, 2012). Passado esse período, foi esperado os corpos de prova alcançarem temperatura ambiente para não prejudicar o acoplamento dos transdutores bem como não interferir no resultado obtido e, então eles foram medidos e pesados para realização do ensaio de velocidade de propagação ultrassônica e, logo em seguida, foram feitos os ensaios mecânicos nos mesmos corpos de prova.

Além disso, outros dados necessários para que seja obtido o valor do módulo de elasticidade, além da velocidade de propagação ultrassônica, são a massa específica do concreto e o coeficiente de Poisson, como pôde ser percebido pelas equações apresentadas acima. Para a massa específica, foi utilizada a massa específica aparente, conforme orienta a norma brasileira, que foi obtida por meio da relação entre a massa do corpo de prova depois de retirado da estufa e o volume calculado pelas dimensões que ele apresenta, conforme indica a Equação 6 conforme realizado por Benetti (2012).

$$\rho_s = \frac{m_s}{V_{cp}} \quad \text{Equação 6}$$

Onde,

ρ_s = Massa específica aparente (kg/m³)

m_s = Massa da amostra seca (kg)

V_{cp} = Volume do corpo-de-prova (m³)

O coeficiente de Poisson, que relaciona as deformações longitudinais e transversais do concreto submetido a esforços de compressão ou tração pode variar de 0,15 a 0,25 e o valor de 0,20 costuma ser adotado e será considerado na pesquisa (SANTOS et al., 2013; BENETTI, 2012). Assim, de posse de todas as variáveis necessárias, é então obtido o valor do módulo de elasticidade dinâmico do concreto.

De maneira resumida, o Quadro 5 indica como serão os procedimentos experimentais para os ensaios no estado endurecido em cada idade estabelecida, para todos os nove corpos de prova utilizados: cinco para o ensaio de resistência à compressão axial, quatro para o de resistência à tração na compressão diametral e todos os nove para o módulo de elasticidade.

Quadro 5 - Ordem de atividades para ensaio de módulo de elasticidade e ensaios mecânicos

DIA ANTERIOR AO ENSAIO MECÂNICO			DIA DO ENSAIO (07, 28, 91 DIAS)		
ORDEM	ATIVIDADE	MOTIVO	ORDEM	ATIVIDADE	MOTIVO
1 ^a	Retirar os CP's da cura	Realização de ensaios	1 ^a	Retirar os CP's da estufa	Realização dos ensaios
2 ^a	Retificar CP's	Para realização do ensaio de velocidade de propagação de onda ultrassônica as faces precisam estar lisas, bem como para o ensaio de resistência à compressão axial	2 ^a	Pesar CP's	Para cálculo da massa específica, necessário para encontrar o módulo de elasticidade
4 ^a	Encaminhar CP's para a estufa a 60°C	Retirar a umidade do corpo-de-prova (a umidade interfere na obtenção da velocidade de propagação de onda ultrassônica)	3 ^a	Medir os CP's (altura e diâmetros)	Necessário para os ensaios mecânicos e o de velocidade de propagação ultrassônica e também para obtenção do volume
-	-	-	4 ^a	Realizar o ensaio de velocidade de propagação ultrassônica	Necessário para o cálculo do módulo de elasticidade
-	-	-	5 ^a	Realizar os ensaios mecânicos: compressão axial e tração na compressão diametral	Resultados da pesquisa

Fonte: A autora.

É importante mencionar que no planejamento inicial das atividades e ensaios, pretendia-se realizar a microestrutura eletrônica de varredura (MEV) e o EDS nas amostras de concreto de modo a verificar a formação de cristais e a composição química de alguns produtos hidratados dos concretos. Entretanto, por razão da pandemia causada pelo novo coronavírus, SARS-CoV2, o funcionamento de muitos laboratórios ficou comprometido, inviabilizando a realização do ensaio.

4.4.4 Ensaio ambiental

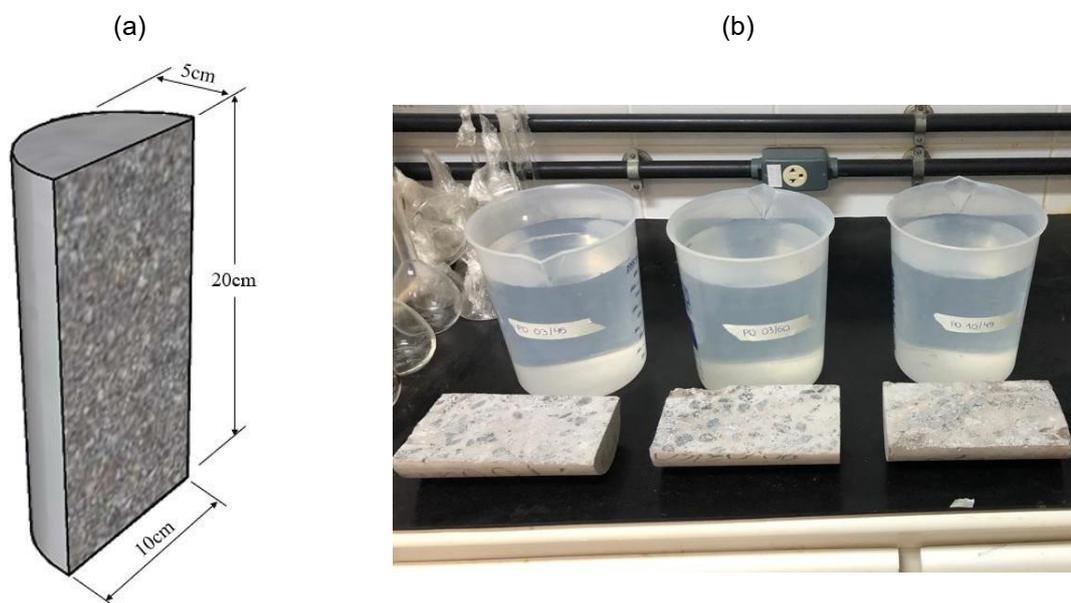
4.4.4.1 Lixiviação do concreto

O ensaio de lixiviação no concreto tem como principal finalidade a avaliação da capacidade desse material em encapsular os metais pesados contidos nos resíduos. Esta técnica, conhecida como estabilização por solidificação, é aplicada em matrizes

cimentícias e tem se mostrado eficaz na avaliação da imobilização dos compostos perigosos presentes nos resíduos, mostrando sua viabilidade de reaproveitamento. Entretanto, no Brasil só existe uma norma de lixiviação, que é aplicada apenas aos resíduos sólidos isolados – NBR 10.005 (ABNT, 2004), e não em materiais monólitos, como os empregados na construção civil. Por esta razão, esta avaliação foi realizada de acordo com as recomendações das normas EA NEN 7345 (NNI, 1995) e EA NEN 7375 (NNI, 2004). O ensaio tem um período de duração de 64 dias, com as amostras imersas em 2,3 litros de água destilada.

Esse ensaio foi feito nos corpos de prova utilizados no ensaio de resistência à tração por compressão diametral, realizado aos 91 dias. Foi selecionada uma metade rompida e ela foi armazenada até que atingissem a idade do ensaio, de 120 dias. Atingida a idade, as amostras foram retificadas para que atingissem a dimensões próximas à apresentada na Figura 24. Em seguida, foram imersas em água destilada, respeitando a relação entre sólidos e líquidos determinada por esta norma.

Figura 24 - Dimensões do corpo de prova para ensaio de lixiviação (a) e corpos de prova serrados para iniciar o ensaio (b)



Fonte: A autora.

A duração de 64 dias do ensaio é dividida em oito etapas de avaliação: após 6 horas, 1 dia, 2 dias e 6 horas, 4 dias, 9 dias, 16 dias, 36 dias e 64 dias. Nessas etapas deve-se filtrar uma quantidade necessária para realização de análise química e medir o pH da solução. Para início de cada ciclo, os recipientes são novamente preenchidos com água destilada respeitando a relação que deve existir entre sólidos e líquidos. Na

Figura 25 é apresentado os corpos de prova imersos em água destilada durante os ciclos.

Figura 25 – Realização do ensaio de tanque



Fonte: A autora.

As amostras coletadas foram armazenadas em tubos do tipo Falcon, com capacidade de 50 mL e encaminhadas ao laboratório de Espectrometria Atômica (LEA), que pertence ao Laboratório de Pesquisa e Desenvolvimento de Metodologias para Análise de Petróleos da UFES (LABPETRO/UFES) para análise química por meio da técnica de Espectrometria de Massas com Plasma Indutivamente Acoplado (ICP-MS). Os compostos químicos avaliados foram o Arsênio, Cádmio, Cobalto, Cromo, Selênio, Chumbo, Manganês, Mercúrio e Zinco.

De posse das análises, foi possível calcular a lixiviação dos metais pesados nas amostras de concreto por meio da Equação 7, assim como foi feito por Teixeira (2019).

$$Bi = \frac{Ci * V}{1000 * A} \quad \text{Equação 7}$$

Onde,

Bi = liberação do elemento por unidade de área no período i (mg/m²)

Ci = concentração do elemento no período (mg/L)

V = volume do lixiviante (L)

A = área superficial do material monolítico (m²)

Após o cálculo do Bi para cada intervalo da mistura avaliada, parte-se para a obtenção da lixiviação total (B_{IT}) referente ao período analisado de 64 dias, que é a lixiviação acumulada ao longo do período, de acordo com a EA NEN 7345 (NNI, 1995). Essa lixiviação total foi então comparada com os valores de U1 e U2, apresentados na Tabela 11, de modo que o valor aqui encontrado seja enquadrado em uma das três categorias abaixo:

- Categoria 1: materiais que apresentam taxa de lixiviação total (B_{IT}) de qualquer contaminante abaixo dos valores de U1. Não apresentam restrições ao uso.
- Categoria 2: materiais que apresentam taxa de lixiviação total (B_{IT}) de qualquer contaminante entre os valores de U1 e U2. Apesar de não apresentarem qualquer restrição ambiental na sua utilização, após a sua vida útil é obrigatório remover os compostos contaminantes que tenham concentrações superiores a U1.
- Categoria 3: materiais que apresentam taxa de lixiviação total (B_{IT}) de qualquer contaminante acima dos valores de U2. Sua utilização na construção civil deve ser restrita, tomando as devidas precauções para evitar a lixiviação dos compostos contaminantes.

Tabela 11 - Padrões cumulativos de U1 e U2 requeridos pela NEN 7345 (NNI, 1995)

	U1 (mg/m ²)	U2 (mg/m ²)
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 (2004).

4.4.5 Tratamento estatístico dos dados

A análise estatística dos resultados obtidos será feita com o auxílio da ferramenta de análise de variância (ANOVA) de modo a determinar estatisticamente se os valores são significativos ou não. Ela compara os valores dentro de cada grupo bem como entre as médias de diferentes grupos avaliados, com a finalidade de verificar a influência de cada variável independente dentro de um nível de significância estabelecido e igual a 5%, mais comumente aplicado na área de engenharia. Para isso será utilizado o *software* Statística®.

5 RESULTADOS

Neste capítulo serão apresentados os resultados alcançados para todos os objetivos específicos da pesquisa, apresentados no Capítulo 1. Inicialmente serão apresentados os resultados das caracterizações dos resíduos e em seguida os resultados dos concretos tanto no estado fresco quanto no estado endurecido e também o ensaio ambiental deles.

Todos os resultados serão apresentados por resíduo, em três grupos: caracterização dos resíduos, resultados dos concretos com o Pó de FEA e resultados dos concretos com a Terra de Shredder. Dessa forma, no item 5.1 serão apresentadas toda a caracterização do Pó de FEA seguida de toda caracterização da Terra de Shredder. No item 5.2 serão apresentados os resultados dos concretos feitos com o Pó de FEA (tanto os resultados no estado endurecido quanto os resultados no estado fresco) e no item 5.3 serão apresentados os resultados dos concretos feitos com a Terra de Shredder (tanto os resultados no estado endurecido quanto os resultados no estado fresco).

5.1 CARACTERIZAÇÃO DOS RESÍDUOS

A caracterização dos resíduos será apresentada a seguir e, quando conveniente – para alguns ensaios específicos, os resultados do cimento serão apresentados junto, para efeito de comparação.

5.1.1 Pó de FEA

5.1.1.1 Caracterização física

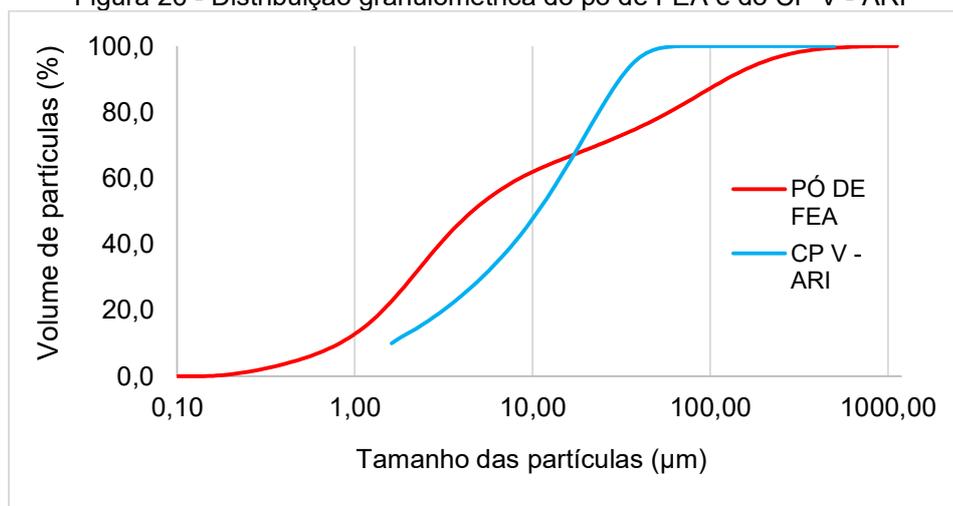
A caracterização física do Pó de FEA envolveu ensaios de massa específica, massa unitária, superfície específica, finura na peneira nº 325 e granulometria a laser. Os resultados encontrados são apresentados na Tabela 12. Todos os valores são comparados com aqueles encontrados para o cimento CP V – ARI. Na Figura 26 é possível analisar como ocorre a distribuição granulométrica do resíduo e do cimento.

Tabela 12 - Resultados de caracterização física do pó de FEA e do CP V – ARI.

Ensaio	Pó de FEA	Cimento
Massa específica (g/cm ³)	4,66	3,10
Massa unitária (kg/m ³)	750,00	-
Superfície específica (cm ² /g)	11656,15	4926,00
Finura na peneira nº 325 (%)	20,00	0,67
Granulometria a laser (µm) Ver Figura 26	D10: 0,923 D50: 5,139 D90: 138,5	D10: 1,61 D50: 10,76 D90: 31,17

Fonte: A autora.

Figura 26 - Distribuição granulométrica do pó de FEA e do CP V - ARI



Fonte: A autora.

O ensaio de massa específica é particularmente importante para entender o volume final de argamassa que o uso das adições minerais pode provocar: quando se utiliza um resíduo com massa específica maior que a do cimento tal ação resulta em menor volume de ligante quando se faz substituição em massa, quando comparado com o volume do traço de origem. O valor encontrado para o pó de FEA é alto quando comparado com os valores encontrados para o cimento e outras adições minerais já empregadas. Essa elevada densidade do material é compatível com sua composição química e mineralógica, com a predominância de zinco e ferro (SOUZA et al., 2010).

Em relação à sua granulometria, avaliada por meio dos ensaios de superfície específica, granulometria a laser e finura na peneira nº 325, pode-se concluir que o pó de FEA é um material de finura elevada, atingindo uma superfície específica superior a 11000 cm²/g. O ensaio de finura na peneira nº 325 não foi suficiente para avaliar de maneira confiável a porcentagem de partículas retidas na peneira de 45µm pois, findado o tempo estabelecido pela norma, o líquido vazante ainda continha grande quantidade de partículas do resíduo, indicando que ainda existiam grãos com diâmetro menor que não haviam passado pela malha.

Em contrapartida, a superfície específica elevada é corroborada pelo ensaio de granulometria a laser, que apresenta um valor de diâmetro médio de 5,139 µm. Magalhães et al. (2019) afirmam que existem duas frações principais para este 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 . Tais declarações justificam as diferenças encontradas na literatura e também o elevado valor obtido para o parâmetro do D90 (138,50 μm). É importante mencionar que estudos de Menad et al. (2003) e Machado et al. (2006) indicam que os metais como Zinco, Chumbo e Ferro, por exemplo, estão mais concentrados na fração fina do resíduo.

A Tabela 13 apresenta alguns valores encontrados nas bibliografias para a massa específica, superfície específica e o diâmetro médio das partículas do pó de FEA. Nela é possível perceber que de fato existem variações para os parâmetros analisados, uma vez que, como já mencionado, eles são dependentes da composição química de cada amostra. Entretanto, de maneira geral, pode-se perceber que a massa específica é elevada, quando comparada com adições minerais tradicionalmente empregadas e o próprio cimento (3,10 g/cm^3), e sua granulometria é muito fina, uma vez que o diâmetro médio do cimento considerado na pesquisa é de 10,76 μm e a superfície específica é de 4950 cm^2/g .

Tabela 13 - Índices físicos do pó de FEA encontrados em outras pesquisas

Pesquisas	Massa específica (g/cm^3)	Superfície específica (cm^2/g)	Diâmetro médio das partículas – D50(μm)
Pagio (2022)	4,66	11656,15	5,139
Souza et al. (2010)	4,08	7310,00	8,50
Silva (2018)	4,24	-	0,48
Vargas, Masuero e Vilela (2004)	4,44	-	0,83
Machado et al. (2006)	-	-	1,88
Ledesma et al. (2017)	3,81	4600,00	7,00
Lozano-Lunar et al. (2019a)	3,85	3700,00	-
Lozano-Lunar et al. (2019a)	3,81	4600,00	-
Magalhães et al. (2017)	3,49	8800,00	10,00
Vieira et al. (2013)	-	-	6,00
Mantovani; kulakowski; Moraes (2014)	4,09	-	9,22
Araújo (2014)	4,47	-	4,00
Nolasco-Sobrinho; Espinosa; Tenório (2003)	4,90		

Fonte: A autora.

Entender como ocorre a distribuição granulométrica do material estudado é de grande importância pois esta propriedade influencia de maneira direta na trabalhabilidade e consumo de água do concreto no estado fresco. Já no estado endurecido pode

favorecer o incremento de resistências mecânicas diminuindo a quantidade e tamanho dos poros ou até mesmo contribuindo na formação de produtos hidratados.

Diante dos resultados apresentados para o pó de FEA, é possível concluir que ele possui propriedades físicas adequadas para o emprego ao qual foi destinado na pesquisa, com atenção especial à sua massa específica pois, em caso de emprego como substituição em massa ao cimento, pode ocorrer menor volume de pasta, influenciando nas propriedades reológicas do material produzido (SILVA; BATTAGIN; GOMES, 2017).

5.1.1.2 Caracterização química

A caracterização química do Pó de FEA compreende as análises de composição química, potencial hidrogeniônico (pH) e perda ao fogo (PF). Os resultados encontrados são apresentados na Tabela 14.

Tabela 14 – Resultados de caracterização química do Pó de FEA

Composição química	Fe ₂ O ₃	ZnO	Na ₂ O	CaO	Cl	MgO	SiO ₂	MnO	K ₂ O	PbO
		42,5	19	8,4	4,3	4	3,1	2,8	2,1	1,6
Composição química	SO ₃	Al ₂ O ₃	P ₂ O ₅	Cr ₂ O ₃	CuO	Br	ZrO ₂	BaO	SrO	TiO ₂
	1	0,38	0,31	0,26	0,2	0,11	ND	ND	<0,1	<0,1
pH	11,72									
PF	8,6									

Fonte: A autora.

De acordo com os resultados apresentados, é possível perceber predominância dos elementos Ferro e Zinco no resíduo, o que vai ao encontro do que outros autores apresentam, onde os dois elementos juntos respondem pela maior parte da composição química do resíduo. A Tabela 15 apresenta um recorte da composição química do resíduo apresentada por outros autores, onde é possível constatar que, apesar de grandes variações nas quantidades, ocorre predomínio dos elementos Ferro e Zinco na composição química do resíduo.

Tabela 15 - Conteúdo de Ferro e Zinco, perda ao fogo e pH encontrados em outras pesquisas.

Composto	Lozano-Lunar (2019)		Pagio (2022)	Ledesma (2017)	Grillo; Tenório; Oliveira (2013)
	Amostra 1	Amostra 2			
Fe₂O₃	29,9	31,8	42,5	30,5	44,9
ZnO	38,3	34,2	19,0	32,8	10,8
Cl	5,09	11,87	4	11,37	2,93
Na₂O	3,24	2,70	8,4	2,59	2,25
Perda ao fogo	NI	NI	8,6	NI	9,1
pH	9,6	13,3	11,7	NI	NI

NI: Não informado

Fonte: A autora.

Como já mencionado, a presença do Zinco se deve ao aproveitamento de sucatas ferrosas com alto índice de material galvanizado alimentando os fornos elétricos à arco (LANZERSTORFER, 2018; SILVA, 2006). Por esta razão, sua presença na composição química pode variar de 2% até 43% (REMUS et al., 2013). Pode-se perceber menores valores desse elemento nos resultados nacionais que são de Grillo, Tenório e Oliveira (2013) e o desta pesquisa, uma vez que a geração de sucata zincada no Brasil é baixa comparada ao resto do mundo.

É importante mencionar também a presença de elementos como o Cloro na composição do resíduo. Em estruturas de concreto armado, a presença de cloretos livres pode desencadear um processo de corrosão das armaduras pelo ataque de íons cloreto, por meio da despassivação as armaduras, comprometendo a integridade e segurança estrutural do sistema (NEVILLE, 2016). Na Tabela 15 pode-se notar teores de até 11,87% na composição do resíduo, sinalizando um ponto de atenção no seu uso.

Outro ponto importante na análise da composição química do resíduo é a presença de álcalis que pode, por ocasião específica, favorecer uma reação álcali-agregado (RAA) no concreto produzido. Os íons alcalinos são os responsáveis pelo ataque à fração reativa dos agregados e o produto resultante desta reação expande quando em contato com a água, comprometendo a durabilidade da estrutura (HASPARYK, 2011).

Além disso, deve-se atentar aos limites estabelecidos pela NBR 16697 (ABNT, 2018) para a presença do óxido de magnésio nos cimentos pela possibilidade de causar

expansão e fissuração no concreto quando em quantidades excessivas (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

Em relação ao pH, nota-se que o resíduo, apesar de apresentar um valor menor do que as matrizes de cimento, apresenta um caráter básico. Estudos de Lozano-Lunar et al. (2019b) apresentam valores também básicos, apesar da diferença entre eles e entre o que foi encontrado nesta pesquisa.

A avaliação do pH e da composição química é particularmente importante quando se avalia o processo de hidratação de matrizes de cimento com este resíduo: conforme mencionado no item 3.3.1, durante este processo há um “período dormente” no qual a taxa de hidratação é muito baixa, em razão da formação do hidrozincato de cálcio (C-Z-H) que reveste os grãos de C_3S , impedindo sua hidratação. Com o aumento do pH, ocorre a dissolução deste composto e o grau de hidratação do C_3S começa a se elevar (MAGALHÃES et al., 2017; VARGAS et al., 2006). Assim, o conteúdo de zinco da amostra afeta de maneira direta este processo e o pH da amostra, caso seja muito baixo, pode também interferir, uma vez que ele influencia o pH da matriz.

A análise do pH do resíduo também é particularmente importante no que diz respeito à mobilidade dos metais. Estudos comprovam que existem relações diretamente e inversamente proporcionais entre o pH de amostras do resíduo e a lixiviação de alguns elementos. Para os elementos como Chumbo, Molibdênio e Cromo, quanto maior o pH da amostra, mais fácil ocorre sua liberação no meio, enquanto elementos como Cádmiio, Cobre e Manganês são mais fáceis de serem liberados para o meio quando a amostra apresenta pH mais baixo, normalmente abaixo de 10 (LEDESMA et al. 2018; SEBAG et al., 2009).

A perda ao fogo do resíduo pode estar associada a fatores como umidade, oxidação do ferro e a volatilização de elementos como Zinco, Chumbo, Cádmiio e Cloro (SILVA, 2006; SILVA; 2018). Silva (2018) realizou o ensaio de perda ao fogo em sua pesquisa e encontrou um resultado de 8,2% que foi corroborado pela análise termogravimétrica, constatando perda de massa praticamente idêntica. Grillo, Tenório e Oliveira (2013) encontraram um valor de 9,1% neste ensaio enquanto nesta pesquisa o valor encontrado foi de 8,6%.

É importante ressaltar também que existem alguns elementos que são indesejáveis no cimento. A presença de SO_3 , por exemplo, em quantidades muito elevadas, pode

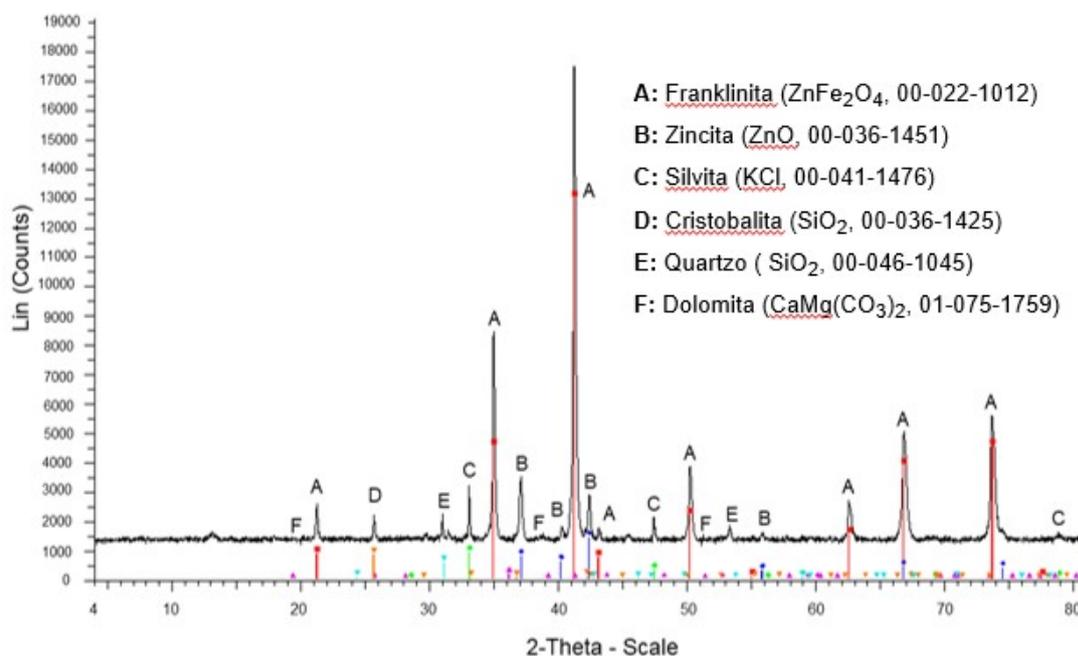
proporcionar a formação de compostos sulfatados que podem promover, por consequência, a formação da etringita tardia que leva à fissuração e expansão do concreto. A NBR 16697 (ABNT, 2018) limita a quantidade desse componente na composição química do cimento em, no máximo, 4,5%. Pelo resultado apresentado, o Pó de FEA apresenta um valor menor do que o limite e, considerando ainda as porcentagens de incorporação baixas, estes teores de SO_3 seriam ainda menores.

Por fim, a presença de compostos como Si, identificados como SiO_2 , devem-se ao arraste de componentes refratários utilizados na fusão do aço enquanto o teor de cloretos está associado às tintas agregadas nas sucatas (SILVA, 2006). A presença do óxido de cálcio é atribuída às adições de cal no forno (ALVES, 2019).

5.1.1.3 Caracterização mineralógica

A caracterização mineralógica do resíduo foi feita por meio da técnica de DRX e os resultados são apresentados na Figura 27.

Figura 27 - Resultado da Difração de Raios-X do Pó de FEA.



Fonte: A autora.

Diante do gráfico apresentado, nota-se que o resíduo se apresenta de maneira predominante como cristalino. As fases prevaletentes são Franklinita e Zincita, as mesmas confirmadas em outros trabalhos (SILVA, 2018; SILVA, 2006; LEDESMA et al., 2017; FARES et al., 2016). A predominância destes minerais confirma o que foi apresentado na composição química, que indica que o resíduo é rico em Ferro e Zinco.

Al-Neghemish et al. (2021) identificaram como minerais predominantes a Zincita e Franklinita, tal qual é visto na Figura 27, e Magnesioferrita ($MgFe_2O_4$) que não foi identificada nesta pesquisa.

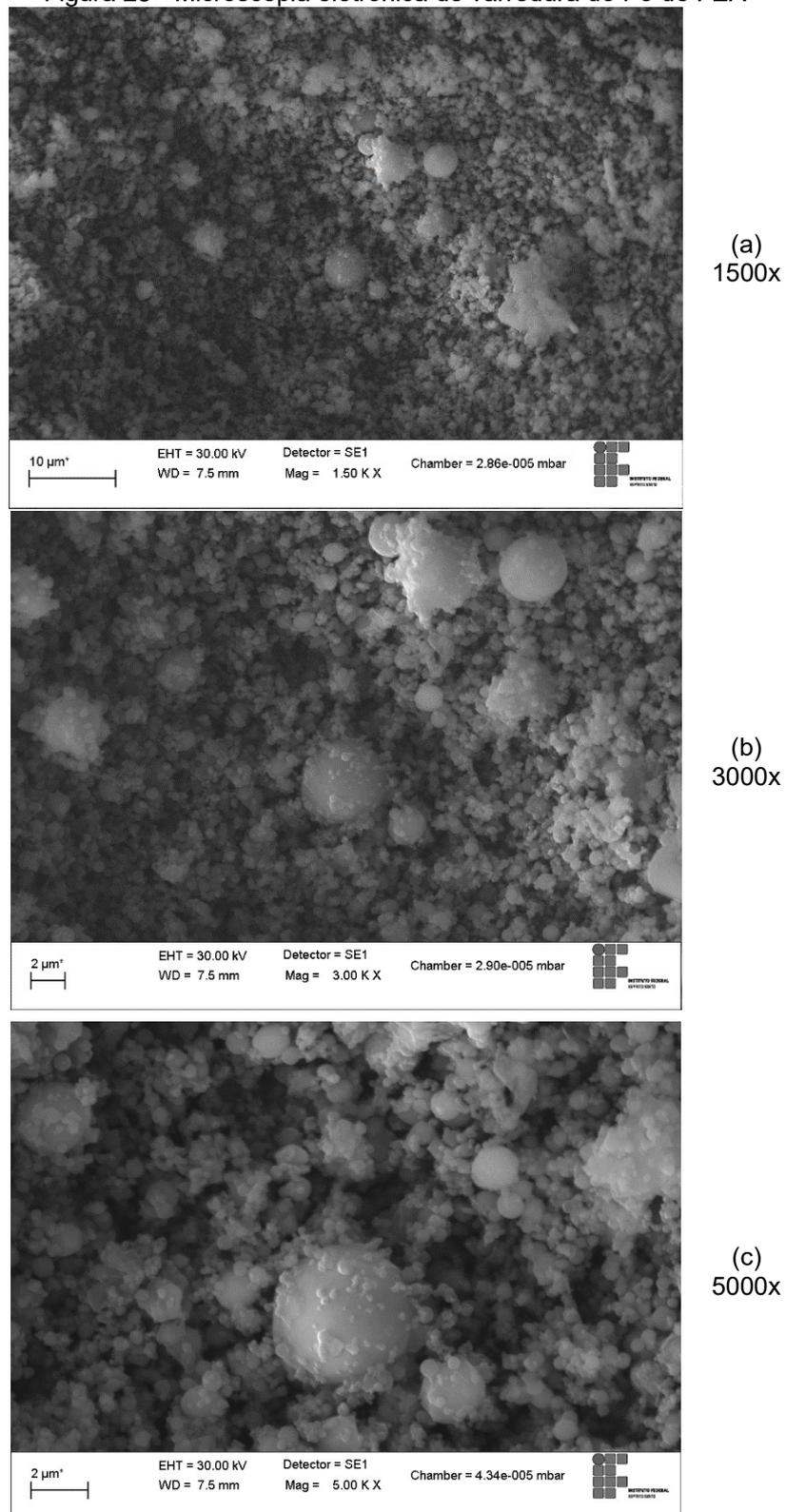
Mesmo com pouca incidência, deve-se mencionar um ponto de alerta em relação à dolomita em matrizes cimentícias. Sua presença pode provocar a reação álcali-carbonato, que resulta em um processo de expansão e consequente fissuração de argamassas e concretos com ela produzidos (OLLIVIER; VICHOT, 2014).

É importante mencionar que, apesar ter sido utilizada a norma de materiais pozolânicos para parâmetro de moagem, não há expectativa de atividade pozolânica por parte do resíduo, tanto pela sua composição química, que não é rica em alumínio e sílica, visto pelo resultado da Tabela 14 e pela caracterização mineralógica aqui apresentada, com comportamento cristalino e não amorfo.

5.1.1.4 Caracterização microestrutural

A caracterização microestrutural do resíduo foi feita por meio da microscopia eletrônica de varredura, em conjunto com a aplicação da técnica de espectroscopia por energia dispersiva. As imagens obtidas são apresentadas na Figura 28. Pelas imagens avaliadas, é possível perceber que os grãos do resíduo se apresentam na forma de um aglomerado de partículas esféricas, de diferentes tamanhos. Tal morfologia é atribuída ao mecanismo de formação do resíduo dentro da aciaria elétrica: a explosão de bolhas de monóxido de carbono no banho de aço, dentro do forno elétrico a arco (SILVA, 2006; SOFILIC et al., 2004; MACHADO et al., 2006).

Figura 28 - Microscopia eletrônica de varredura do Pó de FEA



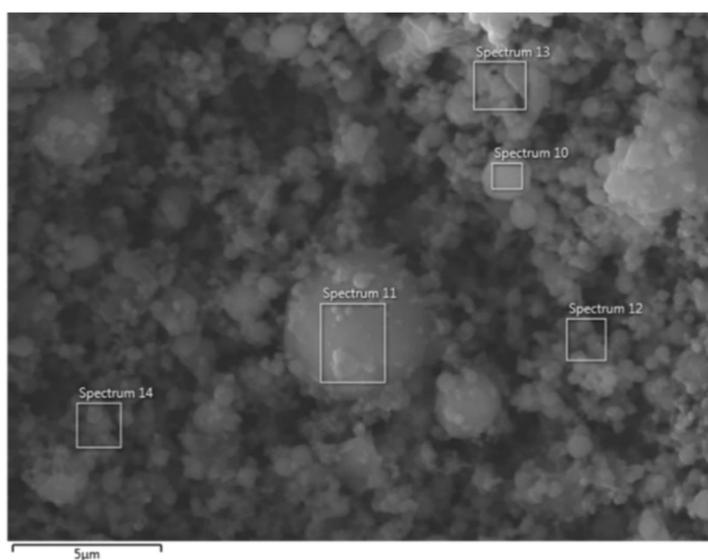
Fonte: A autora.

Guézennec et al. (2005) em seus estudos sobre a morfologia do resíduo, o dividiu em duas categorias: partículas grandes e partículas mais finas. As partículas grandes são aquelas que compreendem partículas de carvão e cal, com formato irregular;

partículas de formato esférico, com dimensões de 20 e 200 μm ; e aglomerado de partículas mais finas, com tamanho variando entre 20 e 1000 μm . Esta categoria de partículas grandes são minoria na composição do resíduo, especialmente os dois primeiros tipos mencionados. A segunda categoria, de partículas finas, com tamanhos entre 0,2 e 20 μm , compõem a maior parte do resíduo e se apresentam com formato esférico. Esta categoria é a que as imagens da Figura 28 apresentam de maneira predominante. Essa diversidade de tamanho de grãos esféricos, confirma o que foi apresentado na caracterização física, onde existe uma fração muito fina do resíduo, mas também existe uma fração de grãos maiores.

Seu formato esférico pode contribuir para propriedades de concretos no estado fresco, conferindo maior trabalhabilidade por meio de um efeito rolamento que estas partículas esféricas podem causar na mistura (MANTOVANI; KULAKOWSKI; MORAES, 2014). Além disso, deve-se notar também que os grãos possuem, aparentemente, superfície lisa, similar ao que foi identificado por Vargas, Masuero e Vilela (2004). A técnica de EDS foi feita tanto em pontos específicos, quanto na região toda. Os resultados são apresentados na Figura 29 e Tabela 16.

Figura 29 - Microscopia eletrônica de varredura, com pontos de EDS, do pó de FEA.



Fonte: A autora.

Tabela 16 - Composição química dos pontos identificados

	O	Fe	Zn	Na	Cl	Mg	Ca	Si	Mn	Pb	S	Al	K	Cr	Ti
Spectrum 10	<u>41,6</u>	<u>29,6</u>	<u>12,1</u>	5,9	2,1	2	1,9	1,6	1,1	0,6	0,5	0,4	0,4	0,1	-
Spectrum 11	<u>35,7</u>	<u>37,5</u>	4,3	<u>5,3</u>	1,3	2,9	3,9	3,3	2,3	0,7	0,1	1,6	0,4	0,3	0,2
Spectrum 12	<u>26,7</u>	<u>24,5</u>	<u>17,7</u>	12,3	8,5	2,4	2,4	1,4	1,4	0,7	0,6	0,4	0,7	0,2	-
Spectrum 13	<u>41,7</u>	<u>24,7</u>	<u>14,6</u>	4,9	2	2,9	2,7	2,2	1,7	0,5	0,8	0,7	0,5	0,1	0,1
Spectrum 14	<u>25,2</u>	<u>33,8</u>	<u>25,8</u>	4,1	1,7	1,7	1,9	1,5	2	1	0,4	0,3	0,2	0,3	0,1
Mapa	<u>34,9</u>	<u>28,3</u>	<u>16,7</u>	5,4	3,0	2,5	2,8	1,8	1,7	0,8	0,6	0,6	0,9	0,2	-

Fonte: A autora.

De acordo com o que foi apresentado, há confirmação da composição química predominantemente composta por Ferro e Zinco, como apresentado na análise de FRX.

Conforme mencionado no item 5.1.1.1, de caracterização física, os metais se concentram na parte mais fina do resíduo, o que está de acordo com o encontrado, uma vez que há predominância de Ferro e Zinco nos pontos 10, 12, 13 e 14. Essas regiões podem ser compostas por Franklinita, em razão do percentual de elementos e tamanho das partículas. No ponto 11 percebe-se menor quantidade de zinco e maiores quantidades de Silício e Cálcio, o que está de acordo com o que outros autores afirmam: os teores de zinco aumentam conforme ocorre redução do diâmetro das partículas (GUÉZENNEC et al., 2005). A quantidade de zinco identificada no ponto 11 possivelmente é atribuída às partículas menores que se sobrepõem à partícula de diâmetro maior.

5.1.1.5 Caracterização ambiental

A caracterização ambiental do Pó de FEA foi feita classificando-o de acordo com o que estabelece a NBR 10004 (ABNT, 2004a). Na Tabela 17 são apresentados os resultados encontrados.

Tabela 17 - Resultado da análise do extrato lixiviado e solubilizado do Pó de FEA

Concentração (µg/L)	Extrato lixiviado		Extrato solubilizado	
	Pó de FEA	Limite da NBR 10004 (µg/L)	Pó de FEA	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: A autora.

De acordo com a NBR 10004 (ABNT, 2004^a), o resíduo é considerado perigoso, caso, dentre outras avaliações, apresente concentrações de metais pesados acima do que o Anexo F desta mesma norma estabelece como limite máximo no extrato obtido no ensaio de lixiviação (tendo como característica de periculosidade a toxicidade). No caso do Pó de FEA, o resíduo se classifica como Perigoso (Classe I) pois as concentrações de Selênio, Chumbo e Cádmio estão acima do limite.

Este resultado é confirmado em pesquisas nacionais e internacionais. Vargas, Masuero e Vilela (2004) realizaram o ensaio de lixiviação e constataram que o Cádmio e o Chumbo ultrapassaram os limites estabelecidos na ABNT 10004 (ABNT, 2004a).

Vahic et al. (2008) realizaram o ensaio de lixiviação de uma amostra do resíduo e identificaram que o Chumbo excedeu o máximo permitido pela legislação vigente na Eslovênia.

Lozano-Lunar et al. (2019a) avaliaram a lixiviação de duas amostras de resíduo por meio da norma UNE-EM 12457-4 (AENOR, 2017) e compararam com o que estabelece a Diretiva Europeia 2003/33. Para a amostra 1, foi constatado que o conteúdo de Cádmio e Selênio ultrapassou os limites estabelecidos, enquanto para a amostra 2, limites de Selênio, Molibdênio e Chumbo se mostraram excedentes, fazendo com que as duas amostras fossem classificadas como Resíduo perigoso.

Ainda neste estudo foi percebido que a amostra 2 apresentou uma liberação de Chumbo muito maior do que na amostra 1. Este fenômeno é explicado pelo valor de pH que o resíduo apresenta: para valores de pH entre 9 e 11, a liberação do Chumbo é mais baixa, enquanto para amostras com pH próximos ou superiores a 12 o Chumbo é facilmente liberado. No estudo mencionado, o pH da amostra 1 foi de 9,6 e o da amostra 2 foi de 13,3, contribuindo para a maior liberação deste elemento (LOZANO-

LUNAR, 2019a; LEDESMA et al., 2018). Nesta pesquisa, o pH identificado no resíduo foi de 11,72, o que, possivelmente, contribuiu para sua maior liberação, ultrapassando os parâmetros estabelecidos pela NBR 10004 (ABNT, 2004a).

Confirmando os exemplos acima mencionados, a Agência de Proteção Ambiental (*Environmental Protection Agency* – EPA) dos Estados Unidos também classifica o Pó de FEA como um resíduo perigoso (ALVES, 2019).

Sua classificação faz com que seja necessária uma disposição em locais adequados, não podendo ser feita em aterros comuns. A disposição deste resíduo em aterros, além de gerar problemas ambientais, aumenta o custo do processo, uma vez que os lugares apropriados para descarte normalmente são instalados distante das fontes geradoras.

5.1.2 Terra de Shredder

5.1.2.1 Caracterização física

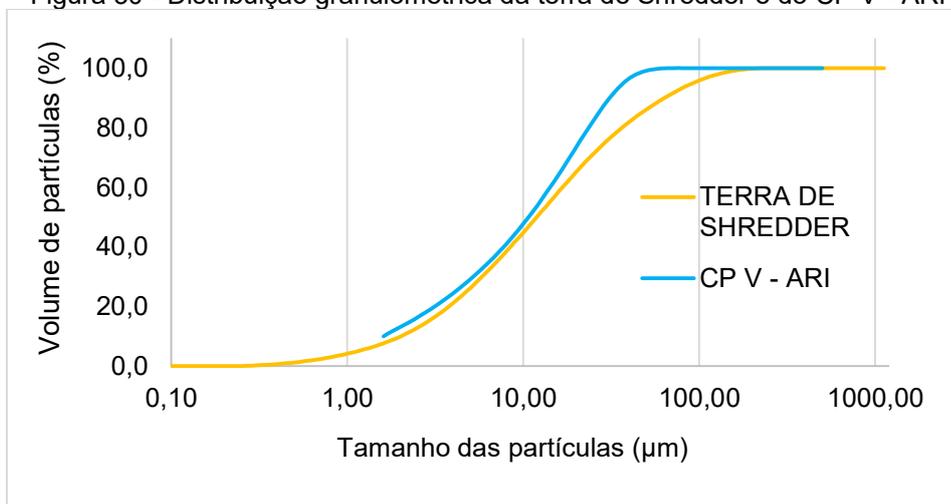
A caracterização física da Terra de Shredder, feita por meio da análise da massa específica, superfície específica e da finura, são apresentadas na Tabela 18.

Tabela 18 - Resultados de caracterização física da terra de Shredder e do CP V – ARI.

Ensaio	Terra de Shredder	Cimento
Massa específica (g/cm ³)	2,85	3,10
Massa unitária (kg/m ³)	790,00	-
Superfície específica (cm ² /g)	9405,00	4926,00
Finura na peneira nº 325 (%)	18,25	0,67
Granulometria a laser (µm) Ver Figura 30	D10: 2,26 D50: 13,42 D90: 71,29	D10: 1,61 D50: 10,76 D90: 31,17

Fonte: A autora.

Figura 30 - Distribuição granulométrica da terra de Shredder e do CP V - ARI



Fonte: A autora.

De acordo com os resultados apresentados, é possível perceber que a Terra de Shredder apresenta características físicas próximas à do cimento Portland. Sua massa específica de 2,85 g/cm² e a sua distribuição granulométrica se mostram perto dos valores encontrados para o CP V-ARI, apesar de um valor para D90 elevado quando comparado ao cimento.

Os estudos acerca do emprego da Terra de Shredder com incorporação em materiais de construção civil são poucos e, normalmente, voltados ao uso conforme o resíduo é gerado, sem o beneficiamento da moagem. Caetano, Schalch e Mazariegos (2016) estudaram a fração menor do que 4,8 mm do resíduo, e realizaram o ensaio de massa específica para agregado miúdo, encontrando o valor de 2,71 g/cm³. Reckziegel (2012) caracterizou duas frações do resíduo: uma menor que 2 mm e outra maior que 2 mm. Para a fração menor do que 2 mm foi encontrado o valor de 2,74 g/cm³. Já para a fração maior que 2 mm, a maior parte do material concentra-se na faixa de 6,3 até 15,9 mm e, para esta análise, foi encontrado o valor de 0,78 g/cm³, provavelmente em razão de materiais como borrachas, tecidos e plásticos. Nesta pesquisa, como o material moído foi aquele passante na peneira de 4,8 mm, a massa específica de 2,74 g/cm³ se apresenta mais coerente para comparação.

Marques e Saldanha (2014) realizaram o ensaio de massa específica para duas frações do resíduo: uma menor que 2,36 mm e outra menor que 1,18mm e encontraram o valor de 3,01 g/cm³ e 3,05 g/cm³, respectivamente.

Estes mesmos autores ainda realizaram o ensaio de granulometria a laser na fração passante na peneira de 0,15 mm e encontraram um valor para D50 igual a 66,9 µm. O valor mais elevado quando comparado com o encontrado nesta pesquisa é atribuído provavelmente ao fato de que o resíduo não passou pelo beneficiamento da moagem.

Não foram encontradas pesquisas que tivessem empregado o beneficiamento de moagem do resíduo, tal qual foi realizado neste trabalho.

5.1.2.2 Caracterização química

A caracterização química do resíduo, feita por meio da análise de composição química, pH e perda ao fogo, é apresentada na Tabela 19.

Tabela 19 - Resultados de caracterização química da Terra de Shredder.

Composição química	SiO₂	Fe₂O₃	Al₂O₃	CaO	Na₂O	MgO	TiO₂	ZnO	K₂O	MnO
	36,0	29,8	6,3	4,9	2,9	1,8	1,1	0,83	0,56	0,47
	BaO	SO₃	PbO	Cr₂O₃	SrO	Cl	P₂O₅	CuO	ZrO₂	Br
	0,44	0,42	0,31	0,25	0,19	0,15	0,13	0,11	0,11	ND
pH	9,62									
PF	13,4									

Fonte: A autora.

De acordo com a Tabela 19 percebe-se que o resíduo apresenta composição química rica em Sílica e Ferro, atribuída possivelmente aos materiais que o compõem como areia e peças automotivas, conferindo a ele um aspecto terroso, similar a um solo. Este resultado está de acordo com o que foi encontrado por Reckziegel (2012) para a fração do resíduo menor que 2 mm, onde foi identificada predominância de Ferro, Sílica, Cálcio, Alumínio e Zinco, porém com quantidades diferentes. A Tabela 20 apresenta alguns valores encontrados em outras pesquisas para a análise química do resíduo.

Pode-se perceber que, apesar da predominância dos mesmos elementos, há uma variedade muito grande em termos quantitativos em razão da heterogeneidade do próprio resíduo.

Tabela 20 - Conteúdo de Ferro e Sílica, perda ao fogo e pH encontrados em outras pesquisas.

Composto	Reckziegel (2012) Fração menor que 2 mm			Pagio (2022)	Marques e Saldanha (2014) Fração menor que 2,36 mm	Marques e Saldanha (2014) Fração menor que 1,18 mm	Péra, Ambroise, Chabannet (2004)	
	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3				Amostra 1	Amostra 2
Ferro	54,53	53,03	57,06	29,8	33,80	34,26	28,78	30,68
Sílica	19,06	19,78	14,64	36,0	29,09	31,56	25,57	21,34
Perda ao fogo	12,07	19,59	18,09	13,4	15,60	13,48	NI	NI
pH	NI	NI	NI	9,62	NI	NI	NI	NI

NI: não informado

Fonte: A autora.

Internacionalmente, alguns autores chamam a fração Terra de Shredder como resíduo incombustível do triturador (ISR). Péra, Ambroise e Chabannet (2004) classificaram duas amostras deste resíduo, que possui diâmetro máximo de 4 mm, e identificaram a predominância de Ferro e Sílica, assim como nas pesquisas brasileiras.

Muitos autores fazem uma classificação visual das amostras de resíduo, considerando tamanha heterogeneidade que elas apresentam. Estudos de Batista (2014) encontraram, para a Terra de Shredder, uma predominância de areia e silte, o que confirma o alto teor de Sílica aqui encontrado.

É importante mencionar também a presença de elementos como o Cloro, os Álcalis e o óxido de magnésio na composição do resíduo. Em estruturas de concreto armado, a presença de cloretos livres pode desencadear um processo de corrosão das armaduras. Em relação aos álcalis, eles podem, por ocasião específica, favorecer uma reação álcali-agregado (RAA) no concreto, atacando a fração reativa dos agregados. Por fim, é importante mencionar que a NBR 16697 (ABNT, 2018) limita a presença de óxido de magnésio nos cimentos pela possibilidade de causar expansão e fissuração no concreto quando em quantidades excessivas (MEHTA; MONTEIRO, 2014; HASPARYK, 2011; NEVILLE, 2016).

Em relação à perda ao fogo, nota-se que os valores se apresentam elevados quando comparados com aqueles tradicionalmente utilizados na construção civil. Estudos de Câmara (2017) caracterizaram algumas frações do resíduo e, para a fração menor que 20 mm foi feito um ensaio que consiste em colocar uma quantidade de resíduo dentro de uma mufla à 950 °C por 5 minutos, encontrando assim um teor de matéria volátil de 18,50%. Péra, Ambroise e Chabannet (2004) trataram o resíduo por 5h em temperatura de 700 °C e identificaram um teor de material orgânico de 14% e 28% para as amostras 1 e 2, respectivamente.

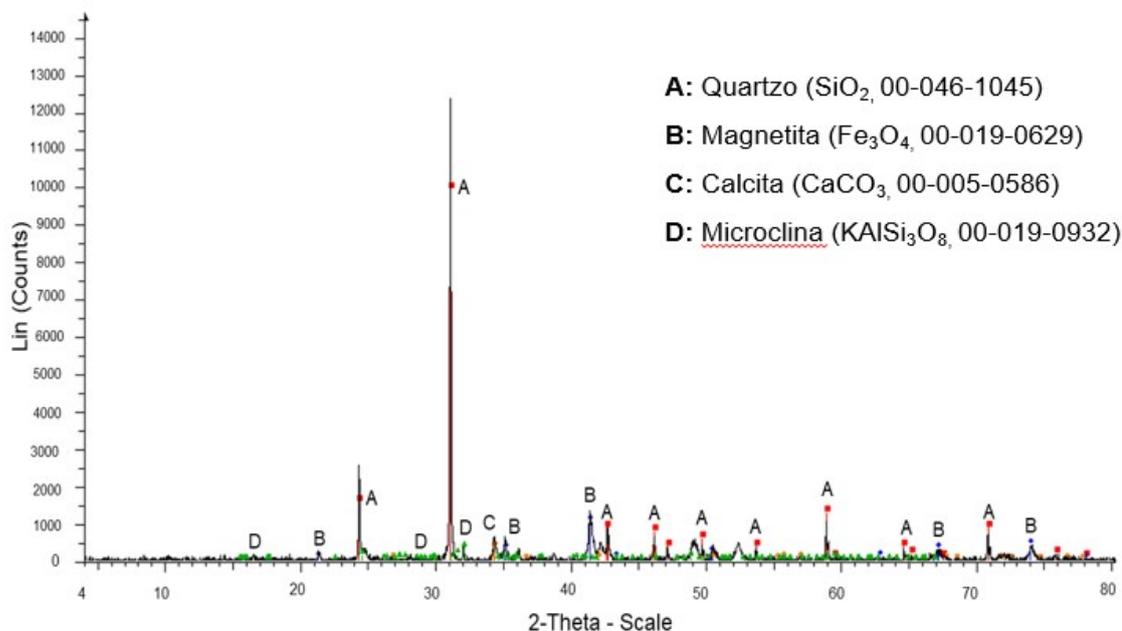
O pH da amostra, de 9,62, apresenta um caráter básico, apesar do distanciamento do pH de matrizes cimentícias, que apresentam um valor entre 12,6 e 13,5 (NEVILLE, 2016). Batista (2014) realizou a análise de pH de 13 amostras da Terra de Shredder e encontrou o valor médio igual a 8,56.

De maneira geral, apesar da predominância de Ferro e Sílica em diversos estudos sobre este resíduo, há uma forte variação na sua composição minoritária, além da presença de metais pesados e da elevada perda ao fogo atribuída possivelmente à presença de matéria orgânica no resíduo. Tudo isso se apresenta como fator limitador no seu emprego em matrizes cimentícias.

5.1.2.3 Caracterização mineralógica

A caracterização mineralógica da Terra de Shredder, feita por meio da técnica de Difração de Raios-X, é apresentada na Figura 31.

Figura 31 - Resultado da Difração de Raios-X da Terra de Shredder



Fonte: A autora.

Pelo resultado apresentado, nota-se a predominância de Quartzo e, em seguida, Magnetita. A presença destes cristais está de acordo com o que foi apresentado anteriormente, onde foi possível perceber que, juntos, o Ferro e a Sílica respondem por mais de 65% da composição química do resíduo.

Nos estudos de Reckziegel (2012), onde foram analisadas amostras da fração menor que 2 mm, também foi identificada a presença da calcita, magnetita e quartzo, este último com predominância, enquanto o mineral microclina não foi identificado. A Tabela 21 apresenta os minerais encontrados por este autor, indicando a predominância do quartzo e a presença de calcita e magnetita, semelhante ao que foi apresentado na Figura 31.

Tabela 21 - Compostos cristalinos identificados por DRX nas frações < 2,00 mm

Amostra analisada	Compostos cristalinos presentes
Amostra 1	Quartzo*, Plagioclásio, Calcita, Dolomita, Hematita e Magnetita
Amostra 2	Quartzo*, Feldspato Alcalino, Plagioclásio, Calcita, Dolomita, Hematita
Amostra 3	Quartzo*, Plagioclásio, Calcita, Dolomita, Magnetita

*minerais majoritários

Fonte: Adaptado de Reckziegel (2012)

Péra, Ambroise e Chabannet (2004) realizaram um tratamento térmico no resíduo, mantendo-o por 5 horas à 700 °C e realizaram o ensaio de difração de raios-X na fração maior que 500 µm, onde identificaram predominância de Quartzo, Calcita e Hematita, além da presença de magnetita, porém em intensidades menores. A predominância de quartzo é atribuída pela presença de areia e solo no resíduo, sob a forma de SiO₂, conforme identificado por Câmara (2017).

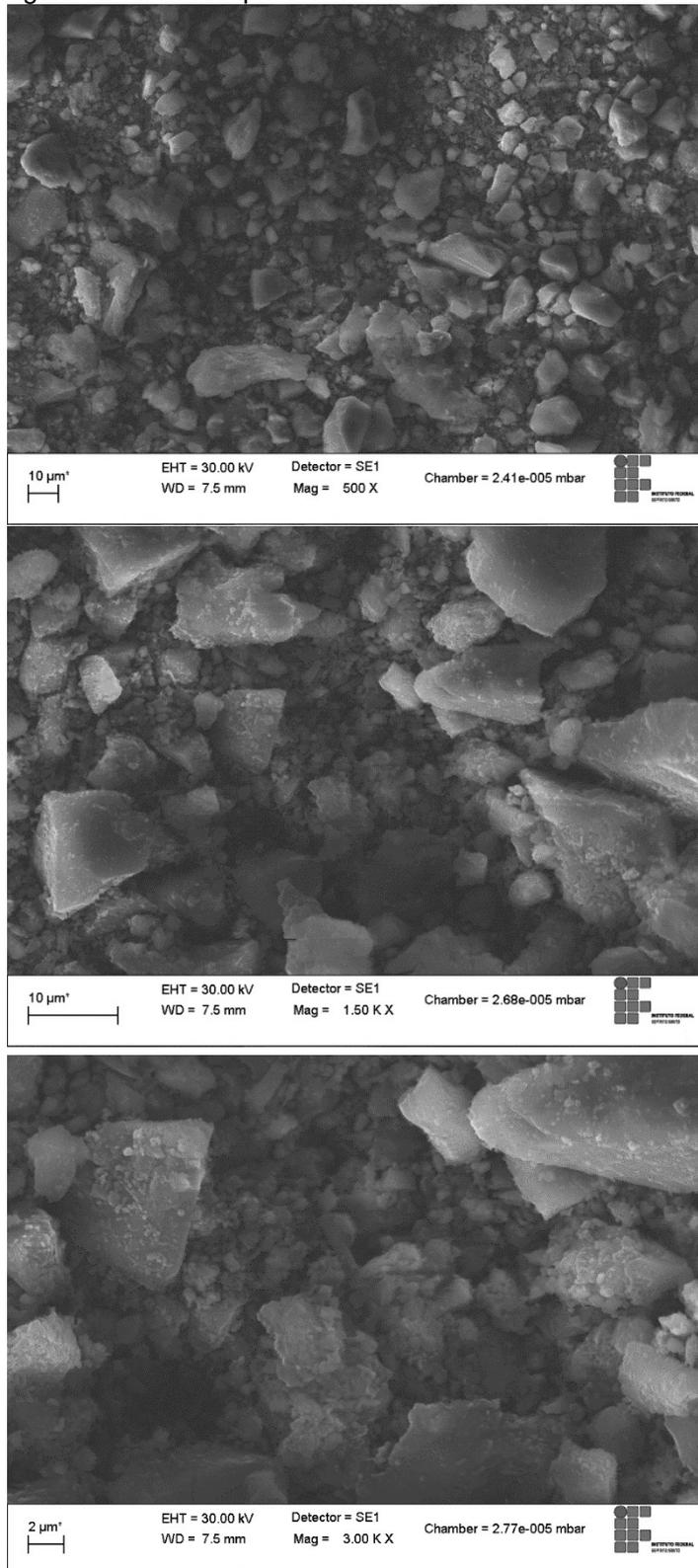
5.1.2.4 Caracterização microestrutural

A caracterização microestrutural feita por meio da análise da microscopia eletrônica de varredura, é apresentada na Figura 32.

Nela pode-se perceber grãos irregulares e angulares e também uma variedade de tamanho de grãos, corroborando a granulometria contínua identificada na caracterização física. Tal comportamento pode ser atribuído ao processo de moagem, quebrando as partículas maiores no moinho de bolas e deixando-as com esta geometria e com tamanhos variados. Além disso, nota-se que as superfícies são levemente rugosas.

Deste modo, os grãos não apresentam um perfil único de comportamento, podendo apresentar diferentes formas e contornos, sempre com a característica de serem angulares e irregulares. Esta característica pode influenciar de maneira direta no comportamento das matrizes cimentícias em relação à trabalhabilidade e conseqüentemente à demanda de água das misturas.

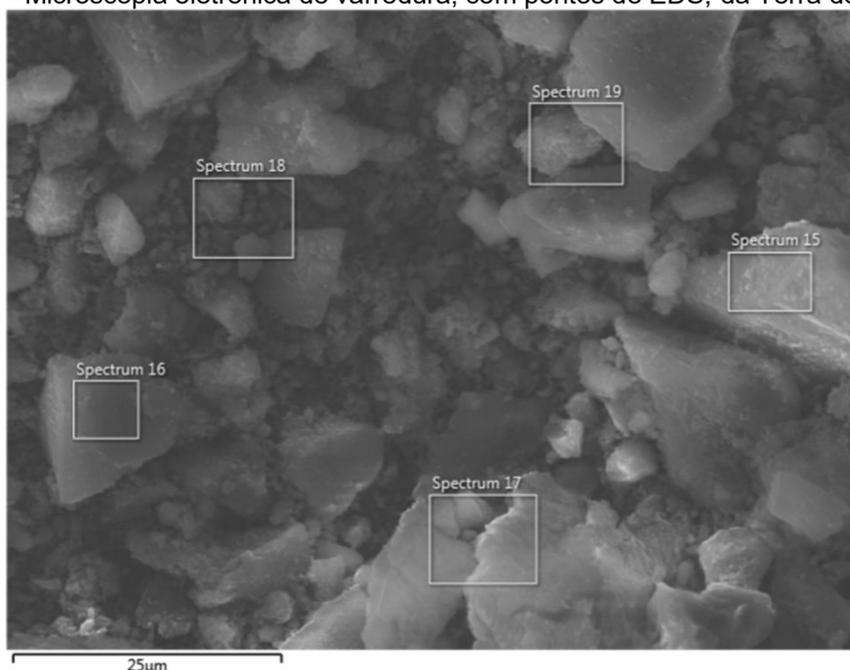
Figura 32 - Microscopia eletrônica de varredura da Terra de Shredder.



Fonte: A autora.

Na Figura 33 é possível verificar o resultado da técnica de EDS, aplicada tanto em pontos específicos, quanto em toda região e a Tabela 22 apresenta a composição química identificada pela técnica.

Figura 33 - Microscopia eletrônica de varredura, com pontos de EDS, da Terra de Shredder.



Fonte: A autora.

Tabela 22 - Composição química dos pontos identificados

	O	Si	Fe	Al	Ca	Na	Mg	K	Zn	Pb	Mn	Ti	S	Cr	Cl
Spectrum 15	51,3	41,3	4,2	1,2	0,7	0,6	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	-	-
Spectrum 16	45,0	48,7	3,9	0,5	0,8	0,4	0,1	0,1	0,1	-	-	0,1	0,2	-	-
Spectrum 17	40,3	19,5	24,8	3,7	3,8	1,0	0,8	0,5	1,5	0,2	0,3	3,0	0,4	0,1	0,1
Spectrum 18	46,9	19,3	22,0	3,2	2,9	2,2	0,9	0,1	0,7	-	0,2	1,0	0,3	0,1	0,1
Spectrum 19	44,7	13,7	16,0	17,4	1,9	3,7	1,1	0,5	0,3	-	0,3	0,2	0,1	-	-
Mapa	44,0	21,0	20,1	4,8	3,1	2,5	1,1	0,5	1,3	0,8	0,5	1,0	0,9	0,1	-

Fonte: A autora.

A predominância dos elementos Ferro e Sílica confirma o que já foi identificado no ensaio de FRX e também no DRX, onde os compostos predominantes são o Quartzo e a Magnetita.

Câmara (2017) realizou a análise de microscopia eletrônica de varredura na fração menor que 20 mm da Terra de Shredder e encontrou os elementos Ferro, Zinco, Silício, Alumínio, Titânio, Cálcio e Manganês, com domínio do Ferro e Silício, assim como nesta pesquisa. Os autores também identificaram grãos com formatos irregulares em virtude do próprio processo de geração do resíduo, uma vez que em sua pesquisa não houve moagem.

5.1.2.5 Caracterização ambiental

A caracterização ambiental da Terra de Shredder foi feita classificando-a de acordo com o que estabelece a NBR 10004 (ABNT, 2004a). Na Tabela 23 são apresentados os resultados encontrados.

Tabela 23 - Resultado da análise do extrato lixiviado e solubilizado da Terra de Shredder.

Concentração (µg/L)	Extrato lixiviado		Extrato solubilizado	
	Terra de Shredder	Limite da NBR 10004 (µg/L)	Terra de Shredder	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: A autora.

De acordo com os resultados encontrados, percebe-se que o resíduo não apresentou nenhum elemento excedente ao que estabelece o limite de extrato lixiviado, logo, não é classificado como perigoso. Entretanto, quando se avalia os parâmetros de extrato solubilizado, nota-se alguns elementos excedentes aos limites (Manganês, Chumbo e Arsênio), o que faz com que ele seja considerado não-inerte. Assim, sua classificação final é Classe II – A (não perigoso e não inerte).

Batista (2014) analisou 13 amostras da Terra de Shredder (fração menor que 2,0 mm) e classificou todas elas como Classe II – A e os elementos que se apresentaram acima do limite foram Alumínio, Ferro, Manganês, Chumbo e uma substância chamada 2,4-D que é uma espécie de herbicida. Caetano (2016) também realizou o ensaio ambiental, porém no material passante na peneira de 4,8 mm, e também o classificou como Classe II – A e os limites excedentes no extrato solubilizado foram Alumínio, Cádmio, Fenóis totais, Ferro total, Fluoretos, Manganês, Selênio e Sulfactantes.

Reckziegel (2012) verificou o material passante na peneira de 2,0 mm e também classificou esta fração como Classe II – A, pois o Ferro e Manganês apresentaram valores excedentes ao permitido. Vermeulen et al. (2011) identificaram que na Europa o resíduo da Shredder é classificado como perigoso, de acordo com o Capítulo 1910 na Diretiva Europeia 91-689-EEC sobre resíduos perigosos.

Apesar de as pesquisas nacionais terem obtido a mesma classificação, nota-se muita variação dos elementos que ultrapassam os limites estabelecidos. Além disso,

internacionalmente o resíduo também recebe outras classificações, confirmando a heterogeneidade que ele apresenta.

5.2 RESULTADOS DOS CONCRETOS COM PÓ DE FEA

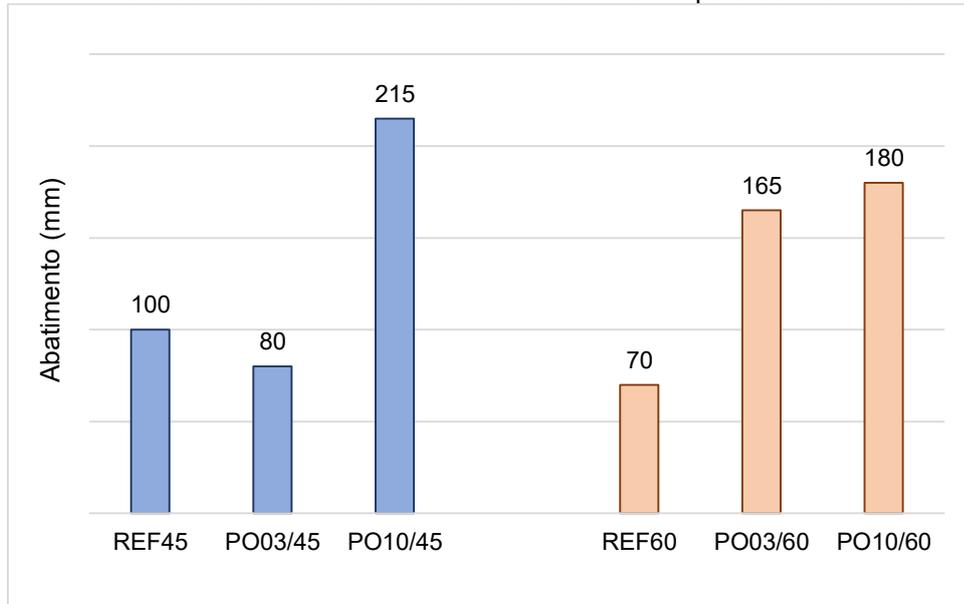
Os resultados dos concretos com o Pó de FEA, tanto no estado fresco, quanto no estado endurecido, são apresentados a seguir. No estado fresco, a trabalhabilidade, a massa específica e o teor de ar aprisionado das misturas foram avaliados enquanto no estado endurecido as avaliações foram feitas por meio da análise da resistência à compressão e à tração, módulo de elasticidade dinâmico e avaliação ambiental. Os resultados são apresentados nos itens a seguir.

É importante mencionar, apesar de não ser um resultado alvo desta pesquisa, que as misturas com 10% de adição do Pó de FEA não foram desformadas no dia seguinte à concretagem pois ainda não haviam endurecido por completo, o que confirma o comportamento visto na revisão bibliográfica de que o resíduo influencia no tempo de pega das misturas.

5.2.1 Consistência dos concretos

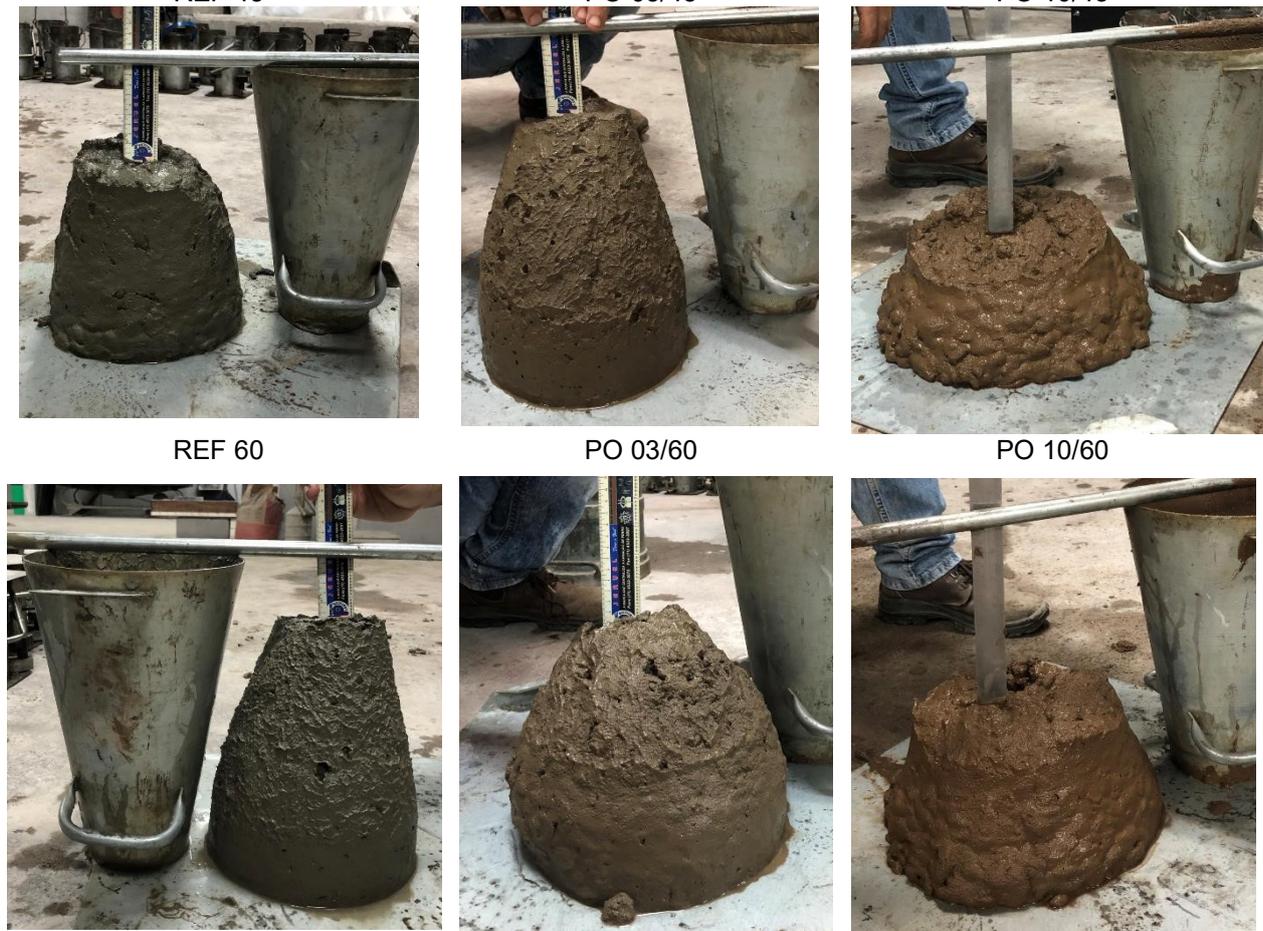
Os resultados do ensaio de abatimento de tronco de cone encontrados para as misturas com o Pó de FEA são apresentados na Figura 34. Na Figura 35 são apresentadas imagens do abatimento de cada traço executado, onde é possível notar também que o resíduo proporciona uma mudança na coloração do concreto, semelhante ao comportamento de um pigmento. Deve-se considerar que o óxido de ferro é a base de muitos pigmentos inorgânicos de coloração amarela, vermelha e marrom (SADASIVAN, THOMAS; 2016) e também é um dos principais elementos encontrados no resíduo, contribuindo para que os concretos apresentem a coloração marrom.

Figura 34 - Resultados do ensaio de abatimento de tronco de cone para as misturas com Pó de FEA



Fonte: A autora.

Figura 35 - Abatimentos dos concretos de referência e com a adição de Pó de FEA



Fonte: A autora.

É possível perceber que, para a relação a/c de 0,6, ao passo em que aumentou o teor de adição, houve também aumento no abatimento destas misturas, sendo que para 10% de adição houve um aumento de 157% em relação à mistura de referência. Para a relação a/c de 0,45, apesar de a mistura com 3% de adição ter apresentado pequena perda de trabalhabilidade, aquela com 10% de resíduo apresentou um ganho de 115% em relação ao concreto sem resíduo.

Diferentemente do que ocorre com outros materiais que, quanto menor a granulometria, maior é a quantidade de água necessária para alcançar certa trabalhabilidade, a incorporação do Pó de FEA, mesmo com uma superfície específica elevada (11656,15 cm²/g), tanto não exigiu aumento de água como também contribuiu para maior abatimento das misturas.

Mantovani, Kulakowski, Moraes (2014) reforçam que a morfologia esférica dos grãos do Pó de FEA proporciona o efeito rolamento das misturas, influenciando na trabalhabilidade. Os autores estudaram a incorporação de 5% do resíduo em argamassas para análise da sua capacidade de pigmentação e notaram aumento do índice de consistência. Vargas, Masuero e Vilela (2004) também indicam que a morfologia do resíduo promove um aumento da fluidez das misturas, que influencia diretamente na trabalhabilidade alcançada.

Resultados semelhantes foram encontrados por Magalhães et al. (2017) nos estudos com argamassas. Os autores fizeram substituições do cimento pelo Pó de FEA em teores de 5%, 10% e 20% e notaram um aumento do abatimento no ensaio de consistência concluindo então que a incorporação do resíduo melhora a consistência das misturas.

Fares et al. (2016) também estudaram a influência da trabalhabilidade de uma argamassa com 3% de incorporação do Pó de FEA para duas relações a/c (0,4 e 0,5) e notaram que houve aumento do espalhamento: para as misturas com relação a/c de 0,4 esse aumento foi de 2,14% e para as misturas com relação a/c de 0,5 o aumento foi de 2,60%.

Maslehuddin et al. (2011) estudaram a incorporação do Pó de FEA em concretos de cimentos com e sem adições minerais, substituindo 2% dessas adições pelo resíduo, conforme indica a Tabela 24. Os autores realizaram o ensaio de abatimento durante um certo intervalo de tempo e constataram que, para todas as misturas, houve

aumento da trabalhabilidade quando ocorriam as substituições das adições minerais pelo resíduo em todos os intervalos de tempo analisados. O maior destaque foi para a mistura 3.1 que alcançou um abatimento de aproximadamente 350 mm na primeira leitura enquanto sua referência (a mistura 3) apresentou, para esta mesma leitura, um valor próximo a 180mm. Os autores concluem que este resíduo é particularmente importante em concretagens realizadas em regiões quentes e secas.

Tabela 24 - Composição da fração de cimento dos concretos estudados

Misturas	Composição dos cimentos do concreto
Mistura 1	100% cimento
Mistura 1.1	98% cimento + 2% pó de FEA
Mistura 2	92% cimento + 8% sílica ativa
Mistura 2.1	92% cimento + 6% sílica ativa + 2% pó de FEA
Mistura 3	70% cimento + 30% cinza volante
Mistura 3.1	70% cimento + 28% cinza volante + 2% pó de FEA

Fonte: Maslehuddin et al. (2011).

Ainda nos estudos com concreto, Massarweh et al. (2020) avaliaram o tempo de retenção do ensaio de consistência, que é o tempo até que o abatimento alcance o valor de zero, definido pelos autores como o período durante o qual o concreto ainda pode ser trabalhado. Os concretos estudados tinham teores de adição do resíduo de 0%, 0,5%, 1%, 2% e 3% e, apesar de na primeira leitura os abatimentos ficarem muito próximos (entre 160 e 180 mm), este tempo de retenção (necessário para que o abatimento seja 0 mm) foi de 105 min, 145 min, 155 min, 180 min e 205 min, para os teores de 0%, 0,5%, 1%, 2% e 3%, respectivamente.

Tal resultado confirma que, apesar das porcentagens de incorporação baixas quando comparadas com esta pesquisa, o resíduo é capaz de contribuir tanto no aumento da trabalhabilidade quanto no tempo de hidratação, conforme já discutido na revisão bibliográfica.

Diante destas referências mencionadas, onde nota-se reincidência de um comportamento que indica melhoria na trabalhabilidade das matrizes cimentícias, é possível que, de fato, a morfologia dos grãos contribua de maneira direta no efeito rolamento das misturas. Em relação à mistura PO 03/45, acredita-se que algum fator externo como o tempo de betoneira e a temperatura ambiente possa ter influenciado no resultado, que apresentou um leve declínio. Deve-se atentar para o fato de que não foi utilizado aditivos nas misturas, de modo a conseguir identificar a influência do resíduo nesta propriedade.

Por fim, é importante mencionar que a NBR 8953 (ABNT, 2015) estabelece classificações para a consistência dos concretos com fins estruturais. As misturas aqui investigadas ficam dentro das classificações S50, S100 e S160. A Tabela 25 indica as classificações das misturas e as aplicações típicas extraídas da norma.

Tabela 25 - Classificação dos concretos de acordo com a NBR 893 (ABNT, 2015)

Mistura	Classe	Aplicações típicas
PO 03/45 REF 60	S50 ($50 \leq A < 100$)	Alguns tipos de pavimentos e de elementos de fundação
REF 45		
PO 10/45 PO 03/60 PO 10/60	S100 ($100 \leq A < 160$)	Elementos estruturais, com lançamento convencional do concreto
	S160 ($160 \leq A < 220$)	Elementos estruturais com lançamento bombeado do concreto

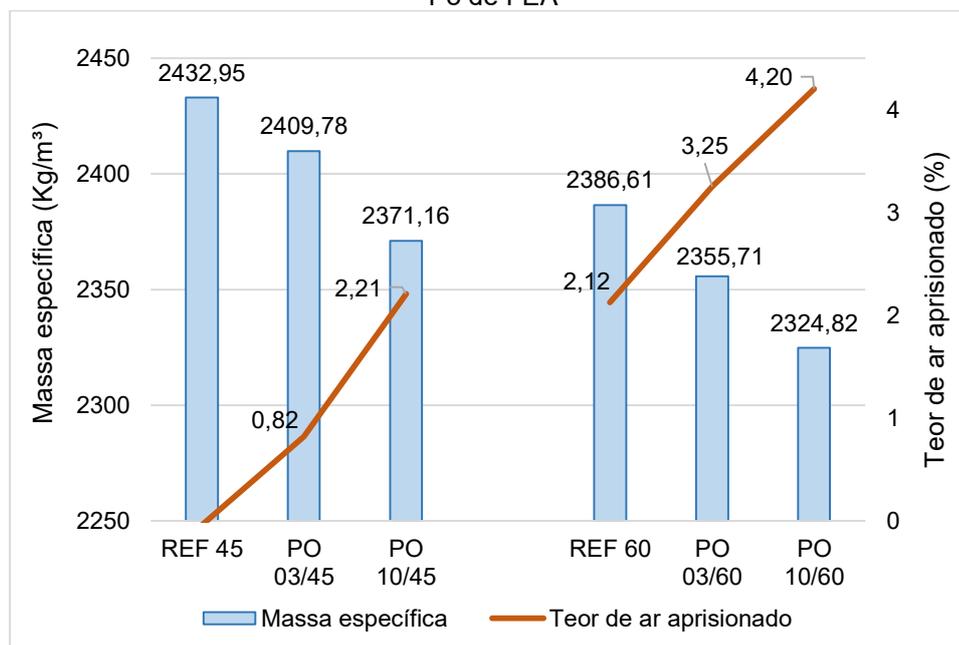
Fonte: A autora.

Pode-se perceber que três misturas com o pó ficaram dentro da classificação S160, indicada para situações que envolvam lançamento e bombeamento do concreto, confirmando sua contribuição na propriedade de trabalhabilidade.

5.2.2 Massa específica dos concretos e teor de ar aprisionado

Os resultados encontrados para as massas específicas dos concretos avaliados são apresentados na Figura 36. É possível perceber um comportamento semelhante para as duas relações *a/c* avaliadas: ao passo em que se aumentou o teor de incorporação do resíduo, a massa específica do concreto diminuiu. Considerando a elevada massa específica do resíduo quando comparada com a do cimento, espera-se um comportamento contrário: aumento do valor de massa específica ao passo em que houve aumento do teor adicionado. Tal situação pode ser atribuída ao teor de ar aprisionado no concreto, que aumentou à medida em que aumentou a incorporação do resíduo, fazendo com que a massa específica no estado fresco diminuísse, para as duas relações *a/c*. Esse acontecimento pode ter ocorrido no processo de moldagem dos corpos de prova, que pode ter favorecido o aprisionamento de bolhas de ar no concreto durante o adensamento, apesar do mesmo ter sido feito de acordo com as recomendações da NBR 5738 (ABNT, 2016), para o adensamento do tipo manual.

Figura 36 - Resultados do ensaio de massa específica e teor de ar aprisionado para as misturas com Pó de FEA



Fonte: A autora.

Magalhães et al. (2019) verificaram que houve ligeira diminuição do valor massa específica no estado fresco das argamassas produzidas quando o resíduo foi adicionado, comparando com a mistura de referência.

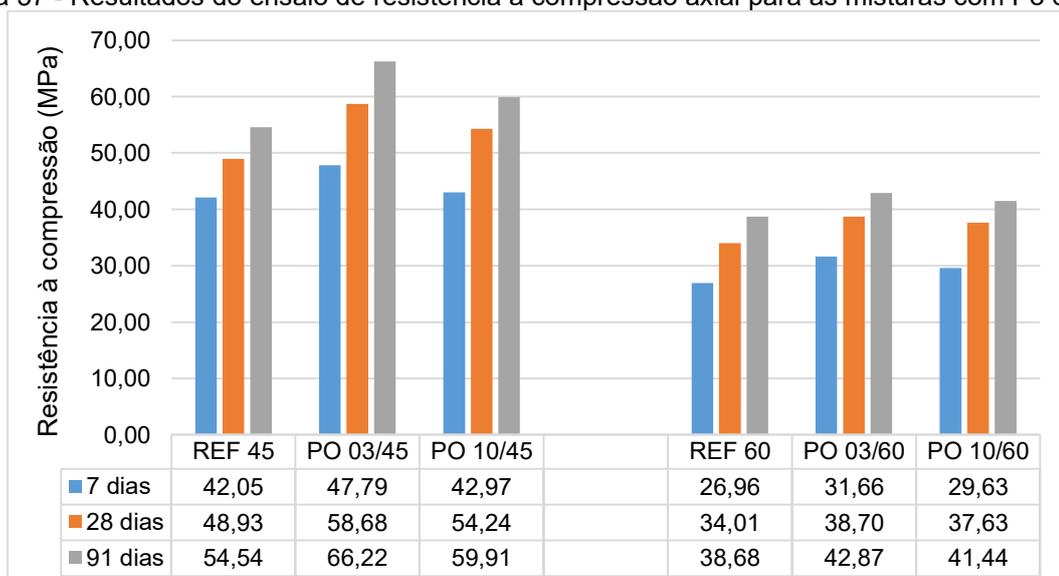
É importante ressaltar que os intervalos de valores encontrados são normalmente identificados em outras pesquisas (TEIXEIRA, 2019; MITTRI, 2016) e as diferenças encontradas não foram expressivas, uma vez que os teores de adição foram baixos, insuficientes para alterar a massa específica de forma mais acentuada.

5.2.3 Resistência à compressão axial

Os resultados encontrados para as misturas de referência e com o resíduo são apresentados na Figura 37. Nela é possível perceber que, conforme já se espera, houve aumento das resistências dos concretos com o tempo, para todas as misturas e para as duas relações a/c avaliadas.

Também é possível perceber que os resultados das misturas com a incorporação do resíduo foram maiores quando comparadas com a mistura referência, para as duas relações a/c e todas as idades avaliadas, especialmente as misturas com 3% de adição.

Figura 37 - Resultados do ensaio de resistência à compressão axial para as misturas com Pó de FEA.



Fonte: A autora.

De modo a comprovar que as variáveis independentes e a interação entre elas exercem influência sobre a variável resposta (resistência à compressão axial) em um nível de 95% de confiabilidade, os dados foram tratados no software STATISTICA 10.0 (STATSOFT, 2004) por meio da análise de variância (ANOVA) e os resultados encontrados são apresentados na Tabela 26. Nela é possível verificar que todos os fatores bem como todas as interações são significativos.

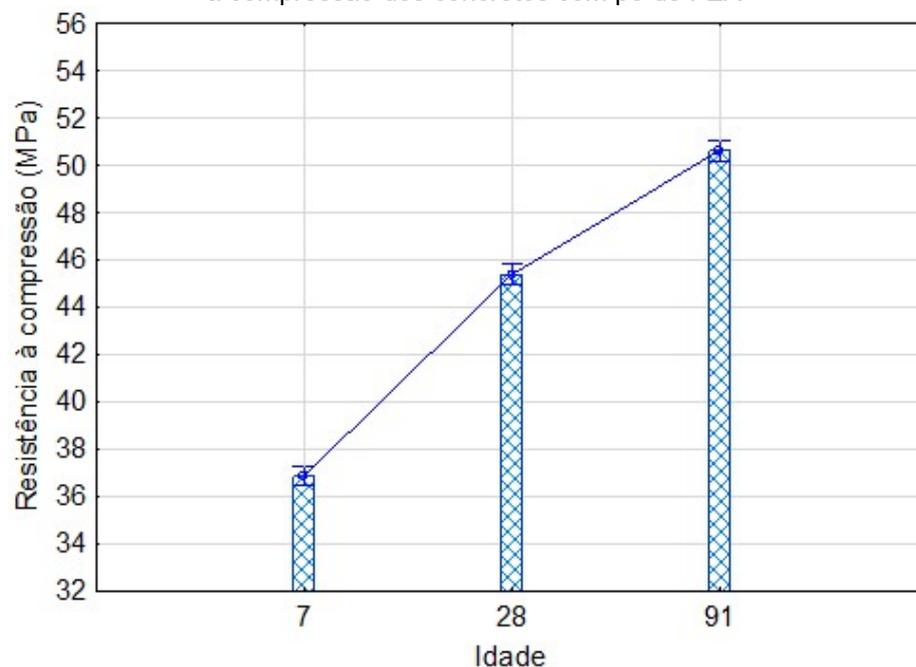
Tabela 26 - Análise de variância da resistência à compressão dos concretos com pó de FEA

Fatores de variação	Soma dos quadrados	Grau de liberdade	MS	F	P	Significância
Idade	2846	2	1423	1049	0,000	Sim
Resíduo	692	2	346	255	0,000	Sim
Relação a/c	6477	1	6477	4776	0,000	Sim
Idade*Resíduo	29	4	7	5	0,001	Sim
Idade*Relação a/c	70	2	35	26	0,000	Sim
Resíduo*Relação a/c	87	2	43	32	0,000	Sim
Idade*Resíduo*Relação a/c	28	4	7	5	0,001	Sim
Erro	96,3	71	1,4			

Fonte: A autora.

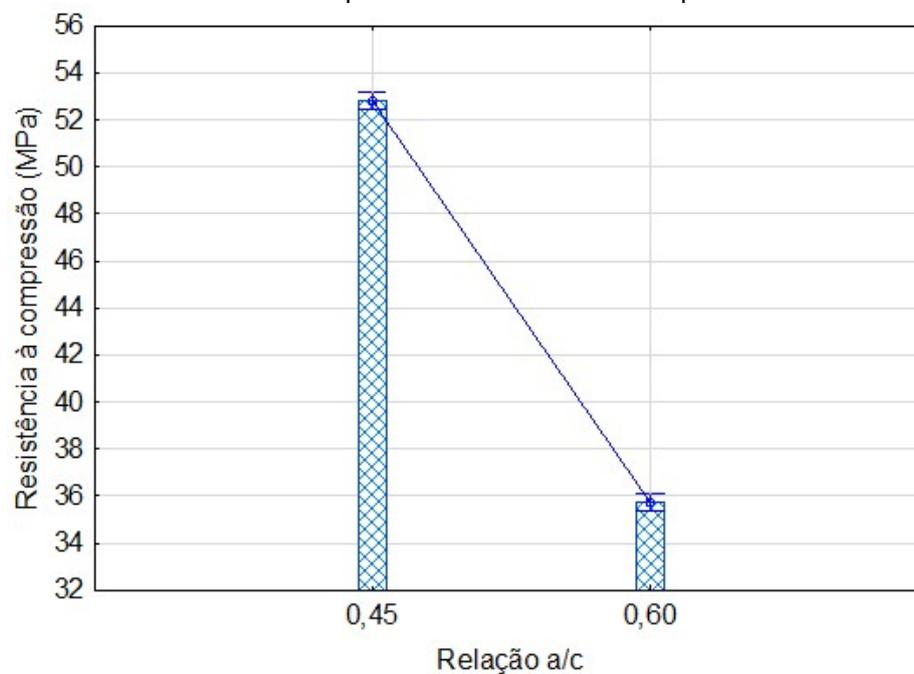
Os comportamentos da resistência à compressão frente ao fator isolado da idade e da relação a/c são apresentados na Figura 38 e Figura 39.

Figura 38 - Gráfico do efeito isolado da variação da idade sobre a média dos resultados de resistência à compressão dos concretos com pó de FEA



Fonte: A autora.

Figura 39 - Gráfico do efeito isolado da variação da relação a/c sobre a média dos resultados de resistência à compressão dos concretos com pó de FEA



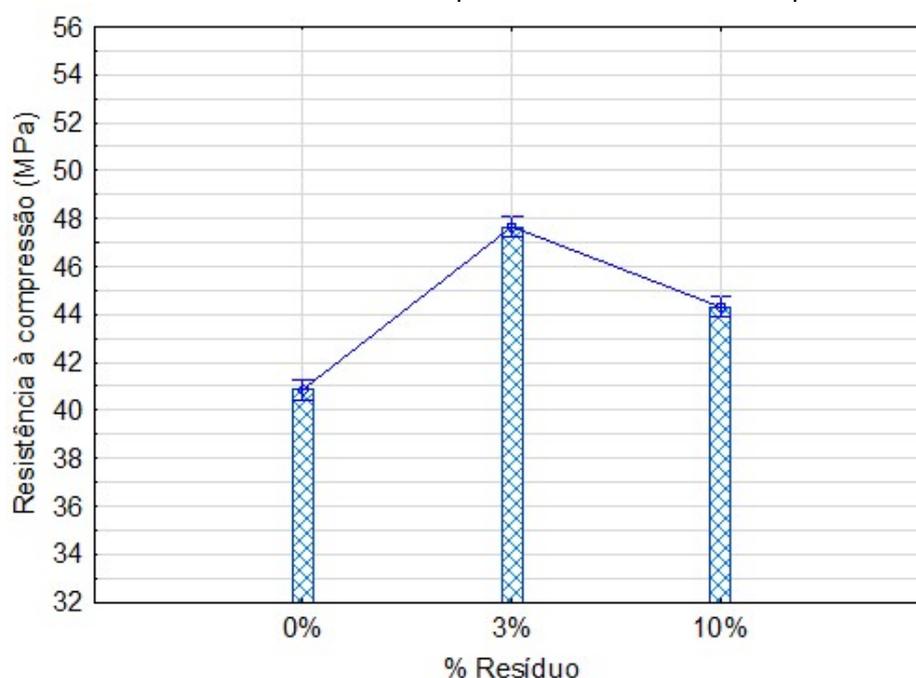
Fonte: A autora.

Esse efeito de ganho de resistência ao longo do tempo é explicado pelo progresso de hidratação da pasta de cimento que resulta em refinamento dos poros e, como

consequência, no aumento da resistência da fase sólida. Esse refinamento dos poros também explica o efeito das diferentes relações a/c sobre a resistência à compressão: uma relação a/c mais elevada ocasiona um considerável volume de poros preenchidos com água, que são consideradas fases não resistentes (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

A Figura 40 apresenta o comportamento da resistência à compressão frente ao fator isolado de percentual de adição de resíduo. Nela é possível perceber que há um comportamento de aumento de resistência com a incorporação de 3% de pó de FEA e consequente decréscimo quando o teor é de 10%, apesar de ainda se manter superior à mistura de referência.

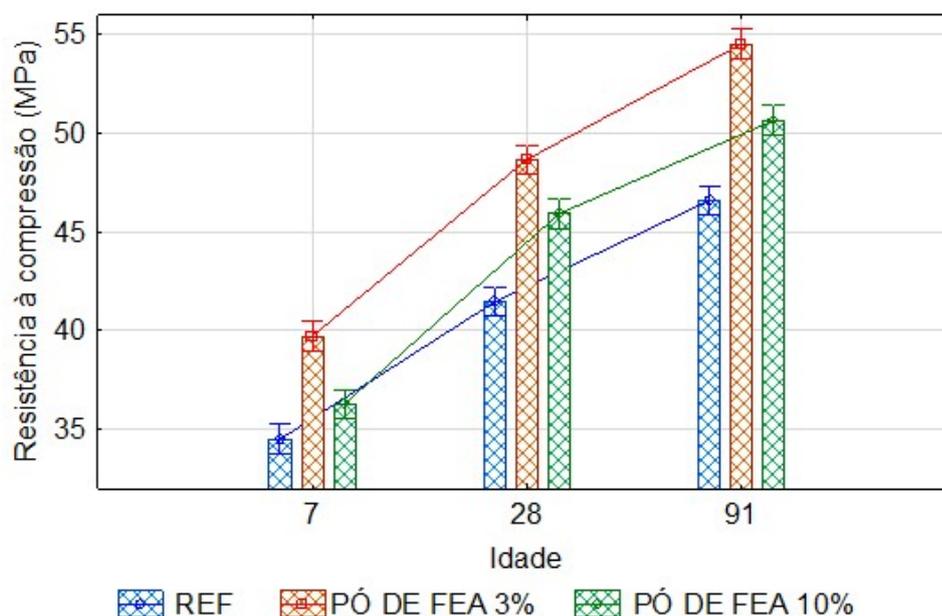
Figura 40 - Gráfico do efeito isolado da variação do percentual de adição de resíduo sobre a média dos resultados de resistência à compressão dos concretos com pó de FEA



Fonte: A autora.

Os concretos produzidos com adição do pó de FEA nos teores de 3% e 10% apresentaram um ganho de resistência de 16,62% e 8,42%, respectivamente, em relação ao concreto de referência. É importante mencionar os resultados do estado fresco dos concretos, apresentados na Figura 36, que indicam aumento do teor de ar aprisionado nas misturas com 10% de adição de resíduo, favorecendo o aumento de poros (fases não resistentes nas misturas) e contribuindo para um menor ganho de resistência visto para os teores de 10%. A Figura 41 mostra a interação do percentual de adição de resíduo e da idade sobre os valores de resistência à compressão.

Figura 41 – Gráfico do efeito da interação entre o percentual de adição de resíduo e a idade sobre a média dos resultados de resistência à compressão dos concretos com pó de FEA



Fonte: A autora.

Analisando o gráfico apresentado, percebe-se um aumento de resistência com a incorporação de 3% do resíduo, seguido de uma queda quando ocorre a incorporação de 10%. Nos estudos de Massarweh et al. (2020), os autores fizeram adições de 0,5%, 1%, 2% e 3% de pó de FEA no concreto e perceberam que, em idades precoces (3 dias) a resistência à compressão das misturas foi baixa, especialmente com 3% de incorporação, mas, em idades mais avançadas (28 e 90 dias), houve aumento dos valores de resistência ao passo em que se aumentou os teores de resíduo.

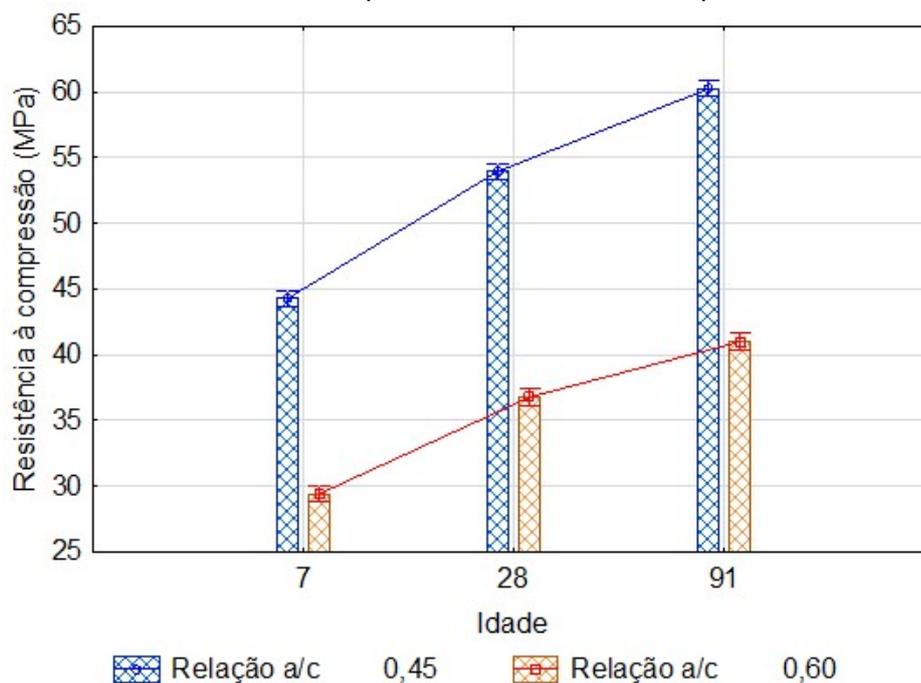
Deve-se notar que o comportamento dos concretos foi o mesmo para as três idades avaliadas, o que indica que aos 7 dias a hidratação já não estava mais comprometida pela presença do resíduo.

Souza et al. (2010) realizaram um estudo com adição do resíduo em teores de 10%, 15% e 20% do resíduo e realizaram o ensaio de compressão aos 28 dias. Diferente do que foi identificado aqui nesta pesquisa, houve aumento das resistências à medida em que o teor de adição aumentou. Entretanto, é importante mencionar novamente o resultado do teor de ar aprisionado que pode ter interferido no ganho de resistência mecânica nos concretos com 10% de adição e pode ter ocorrido em razão da moldagem manual que está mais suscetível a imprecisões.

Na Figura 42 é possível verificar a interação da idade com a relação a/c e sua influência sobre o comportamento de resistência à compressão dos concretos. Nela é

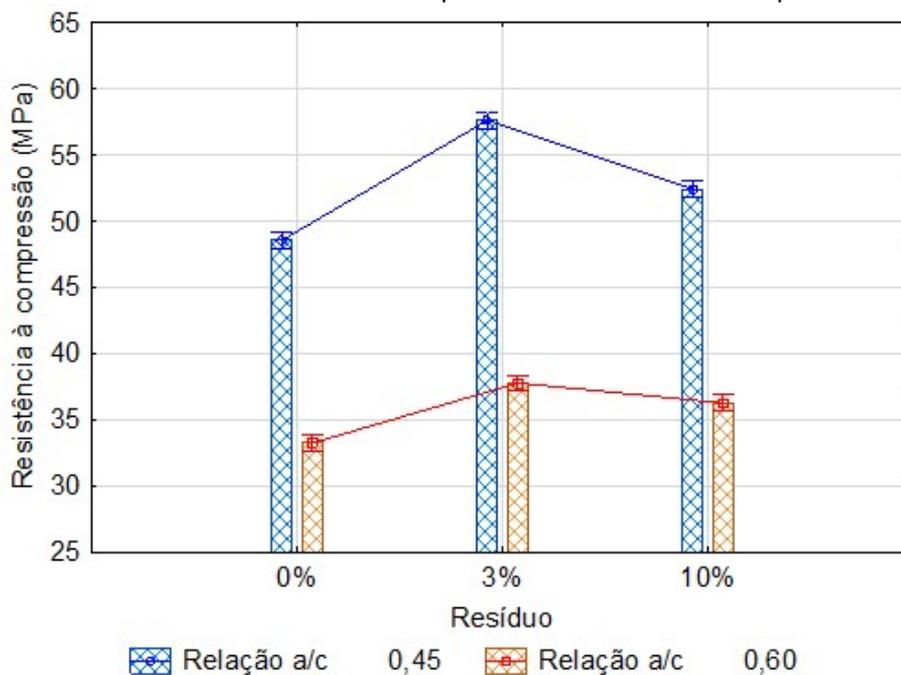
possível perceber um comportamento que já é esperado: um aumento da resistência mecânica com a idade e também valores de resistência menores quando se utiliza uma relação a/c mais elevada. Já a Figura 43 apresenta o gráfico da interação entre o percentual de adição de resíduo e a relação a/c e sua influência sobre o comportamento de resistência à compressão dos concretos.

Figura 42 - Gráfico do efeito da interação entre a idade e a relação a/c sobre a média dos resultados de resistência à compressão dos concretos com pó de FEA



Fonte: A autora.

Figura 43 - Gráfico do efeito da interação entre o percentual de resíduo e a relação a/c sobre a média dos resultados de resistência à compressão dos concretos com pó de FEA.



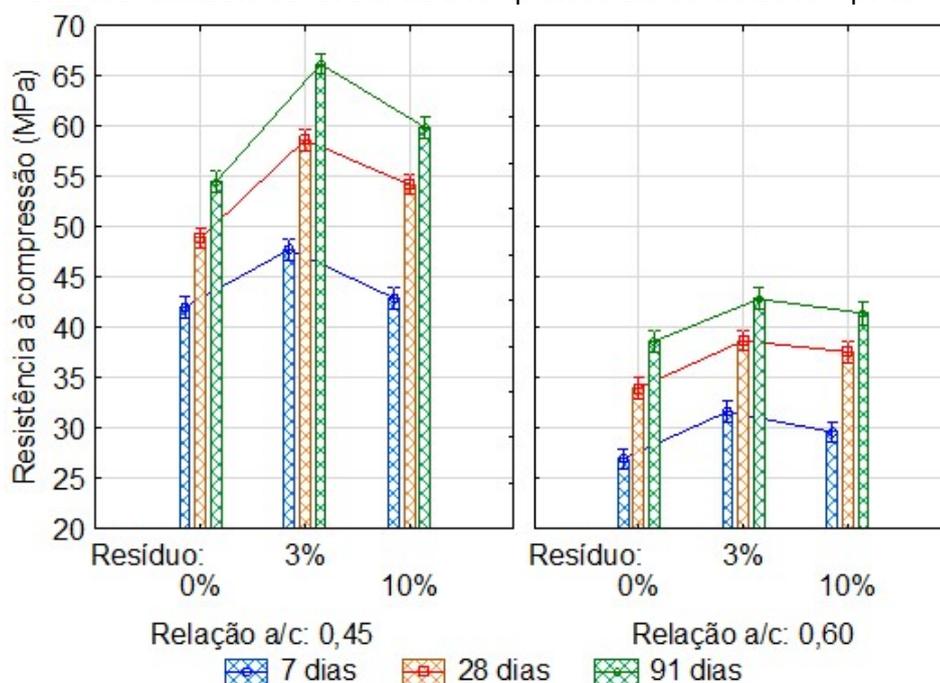
Fonte: A autora.

Fares et al. (2016) informam que, nas argamassas, as misturas com relação a/c de 0,5 apresentaram ganhos de resistência maiores do que aquelas com relação a/c de 0,4 concluindo que o desempenho das matrizes de cimento são ainda melhores em elevadas relações a/c. Entretanto, tal comportamento não foi aqui identificado uma

vez que o incremento de resistência para as duas relações a/c utilizadas, tanto em relação ao percentual de resíduo quanto em relação à idade, foi muito próximo.

A Figura 44 apresenta o efeito da interação tripla entre a idade, o percentual de resíduo e a relação a/c sobre o resultado de resistência à compressão.

Figura 44 - Gráfico do efeito da interação entre o percentual de resíduo, a relação a/c e a idade sobre a média dos resultados de resistência à compressão dos concretos com pó de FEA.



Fonte: A autora.

Nota-se um comportamento semelhante nas duas relações a/c e nas três idades avaliadas: há um aumento da resistência à compressão com a adição de 3% e posterior declínio, apesar de ainda se manter mais elevada quando comparada com a referência.

Na análise do resultado de resistência à compressão, é importante relembrar a hipótese de atuação química que o pó de FEA causa no concreto, segundo algumas pesquisas. Primeiramente, ocorre a formação de um hidróxido de zinco ($Zn(OH)_2$) que reveste a superfície dos grãos anidros do cimento. Após essa etapa as concentrações de Ca^{+2} e OH^- transformam esse hidróxido de zinco em um composto cristalino, hidrozincato de cálcio – C-Z-H ($CaZn_2(OH)_6 \cdot 2H_2O$) e, com o avanço do tempo e com a progressão da hidratação, há um aumento do pH do concreto e então ocorre a dissolução deste composto. Com essa dissolução, há uma reação de troca do cálcio pelo Zinco: o zinco reage com o silicato de cálcio hidratado (C-S-H) formando um novo

composto, o silicato de zinco hidratado, chamado de Z-S-H ($\text{Zn}_4(\text{Si}_2\text{O}_7)(\text{OH})_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$) (FARES et al. 2016; MAGALHÃES et al., 2017).

Fares et al. (2016) relatam que um dos compostos anidros do cimento que participam desta reação inicial é o C_3A , fazendo com que a formação de cristais de etringita seja inibida. Em sua pesquisa, ele avaliou a microscopia eletrônica de varredura de pastas de cimento com substituição do cimento pelo pó de FEA em teores de 0,4%, 0,8%, 1,5%, 2,0%, 2,5% e 3,0% aos 28 dias de cura e percebeu que ocorre o desaparecimento gradual dos cristais de etringita das pastas ao passo em que houve aumento da incorporação do resíduo. Além disso, pôde ser percebido, pela técnica de EDS, que na mistura com 3%, há a presença de zinco nos compostos hidratados. Os autores informam ainda que em níveis de incorporação de 3% as ligações temporárias tornam-se permanentes, alterando a química de hidratação do cimento.

Fares et al. (2016) explicam ainda que o desenvolvimento da resistência à compressão das argamassas feitas com o pó de FEA pode ser atribuído ao processo de formação do Z-S-H, confirmando o efeito químico do resíduo com o cimento. Verificando nesta pesquisa que houve acréscimo de resistência, seguido de um leve declínio, ainda que com valores maiores que a mistura de referência, entende-se que o resíduo atua quimicamente no processo de hidratação, e que a quantidade de 3% é vista como ideal para aprimorar os resultados mecânicos, conforme outros autores identificaram. Apesar disso, não há como atribuir a queda de resistência mecânica para as misturas de 10% à presença do resíduo, considerando que houve aumento do teor de ar aprisionado nessas misturas o que seguramente contribuiu para o declive identificado.

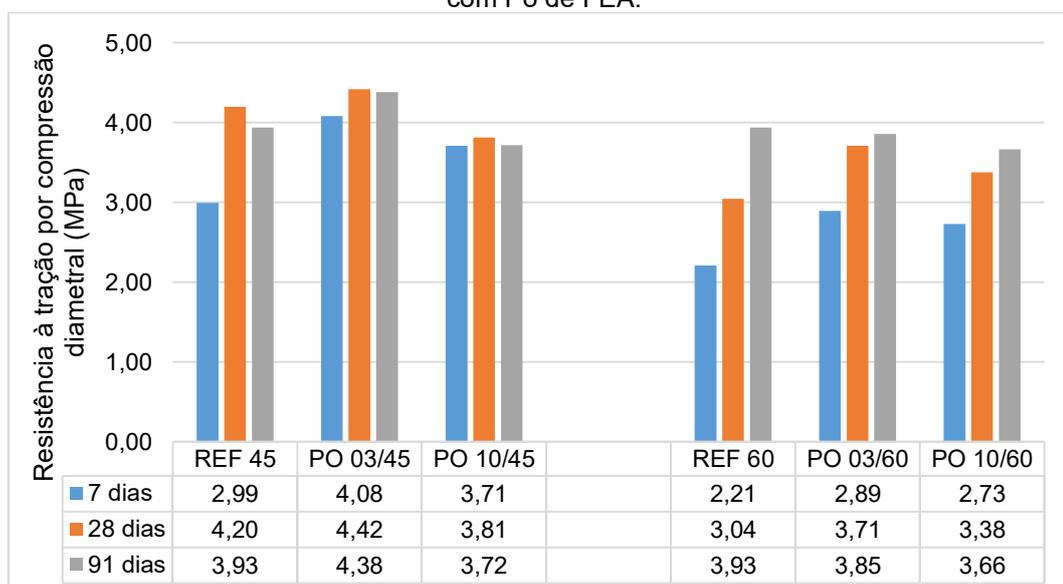
Magalhães et al. (2017) estudaram a substituição de cimento pelo resíduo em teores de 5%, 10% e 20% em argamassas e identificaram um comportamento muito semelhante ao que foi aqui apresentado: as misturas com teores de 5% apresentaram valores maiores de resistência à compressão em todas as idades avaliadas, quando comparadas com a referência. Para os teores de 10% e 20%, houve decréscimo do valor, sendo que o teor de 10% se aproximou do valor de referência enquanto o teor de 20% ficou abaixo da argamassa de referência, também em todas as idades avaliadas (3, 7 e 28 dias).

Apesar dessa hipótese de formação de novos compostos hidratados, deve-se mencionar também a possibilidade de efeito filler que o resíduo causa no concreto, semelhante ao que foi identificado por Souza et al. (2010). Tal hipótese é levantada especialmente considerando que o resíduo não se apresenta amorfo, o que reduz seu poder reativo quando inserido em concreto e, considerando sua finura elevada, pode favorecer a nucleação e o preenchimento da microestrutura, desempenhando este papel de preenchedor.

5.2.4 Resistência à tração por compressão diametral

Os resultados encontrados para as misturas de referência e com o resíduo são apresentados na Figura 45. Nota-se que, para as misturas com relação a/c de 0,6, houve aumento das resistências com o tempo, enquanto para as misturas com relação a/c de 0,45 esse comportamento não se repetiu para as idades de 28 e 91 dias.

Figura 45 - Resultados do ensaio de resistência à tração por compressão diametral para as misturas com Pó de FEA.



Fonte: A autora.

De modo a verificar se as variáveis independentes e a interação entre elas exercem influência sobre a variável resposta (resistência à tração) em um nível de 95% de confiabilidade, os dados foram tratados no software STATISTICA 10.0 (STATSOFT, 2004) por meio da análise de variância (ANOVA) e os resultados encontrados são apresentados na Tabela 27. Nela é possível verificar que apenas os fatores isolados

de idade, resíduo e relação a/c foram significativos e exerceram influência no resultado de resistência à tração.

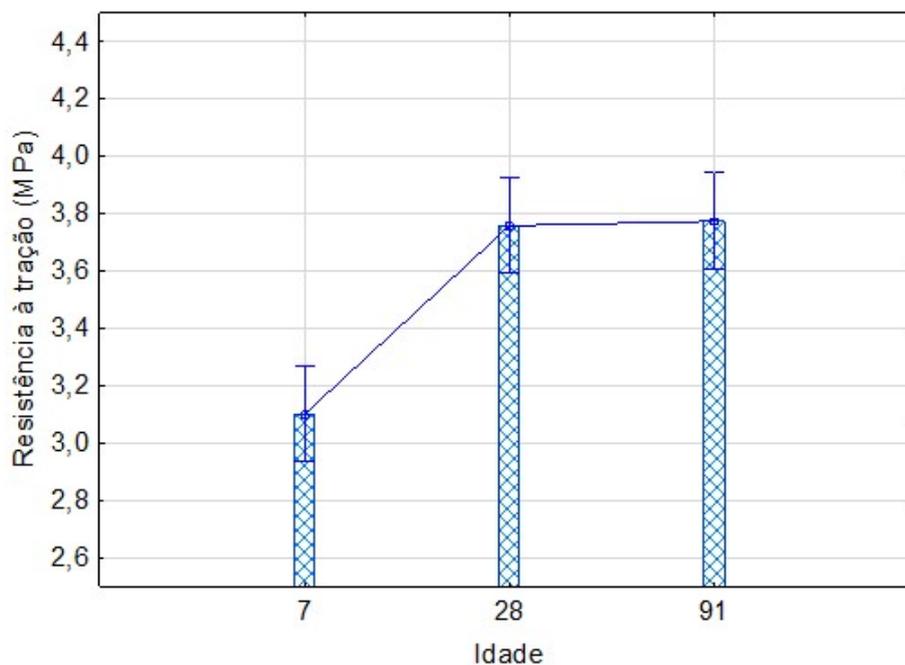
Tabela 27 - Análise de variância da resistência à tração dos concretos com pó de FEA

Fatores de variação	Soma dos quadrados	Grau de liberdade	MS	F	P	Significância
Idade	7,017	2	3,509	21,56	0,000	Sim
Resíduo	5,038	2	2,519	15,48	0,000	Sim
Relação a/c	9,701	1	9,701	59,62	0,000	Sim
Idade*Resíduo	0,903	4	0,226	1,39	0,251	Não
Idade*Relação a/c	0,76	2	0,38	2,34	0,107	Não
Resíduo*Relação a/c	0,594	2	0,297	1,82	0,171	Não
Idade*Resíduo*Relação a/c	0,693	4	0,173	1,07	0,383	Não
Erro	8,6236	53	0,1627			

Fonte: A autora.

Os comportamentos da resistência à tração frente ao fator isolado da idade e da relação a/c são apresentados na Figura 46 e Figura 47.

Figura 46 - Gráfico do efeito isolado da variação da idade sobre a média dos resultados de resistência à tração dos concretos com pó de FEA



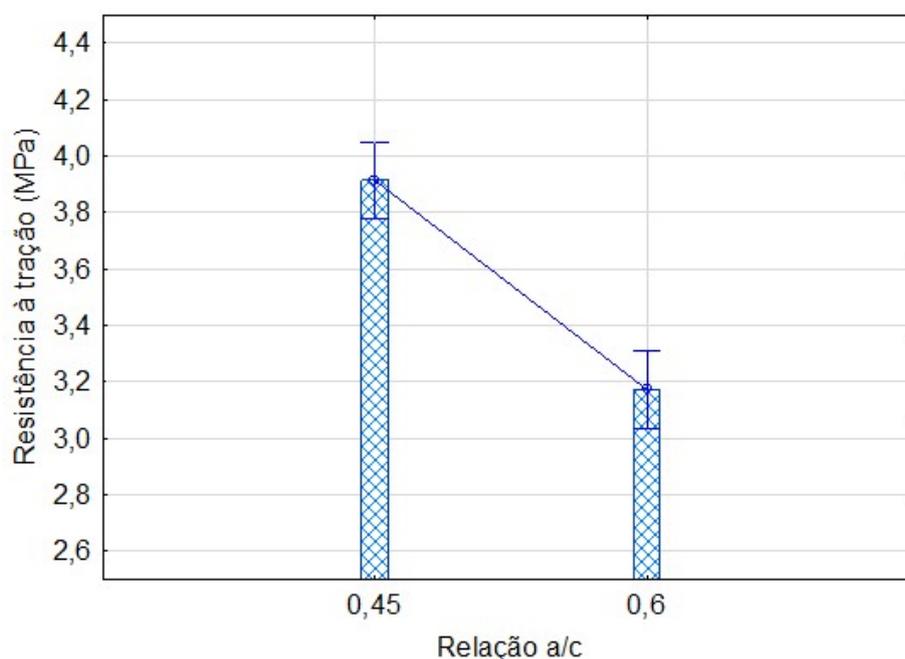
Fonte: A autora.

Em relação à análise da idade, nota-se um crescimento acentuado entre as idades de 7 e 28 dias, porém pouca evolução entre as idades de 28 e 91 dias. Outros autores também identificaram esse mesmo comportamento, como Teixeira (2019). Mehta e Monteiro (2014) explicam que há uma proporcionalidade entre a resistência à tração e à compressão ao passo que, se a resistência à compressão aumenta, espera-se um

aumento da resistência à tração, porém dentro de uma relação decrescente. Estes mesmos autores afirmam ainda que, após um mês de cura, a resistência à tração do concreto aumenta mais lentamente do que a resistência à compressão, ou seja, a razão resistência à tração/compressão diminui com a idade de cura, justificando o comportamento aqui identificado.

Na análise da relação a/c (Figura 47) percebe-se um comportamento esperado, conforme também foi identificado na resistência à compressão, onde os valores de resistência à tração para a relação a/c de 0,6 apresentou menores resultados quando comparados com aqueles da relação a/c 0,45. Isso ocorre, pois, uma relação a/c mais elevada ocasiona um considerável volume de poros preenchidos com água, que são fases não resistentes. Esse acúmulo, especialmente na zona de transição enfraquece a região e acelera o processo de microfissuração que leva o concreto à ruptura (NEVILLE, 2016).

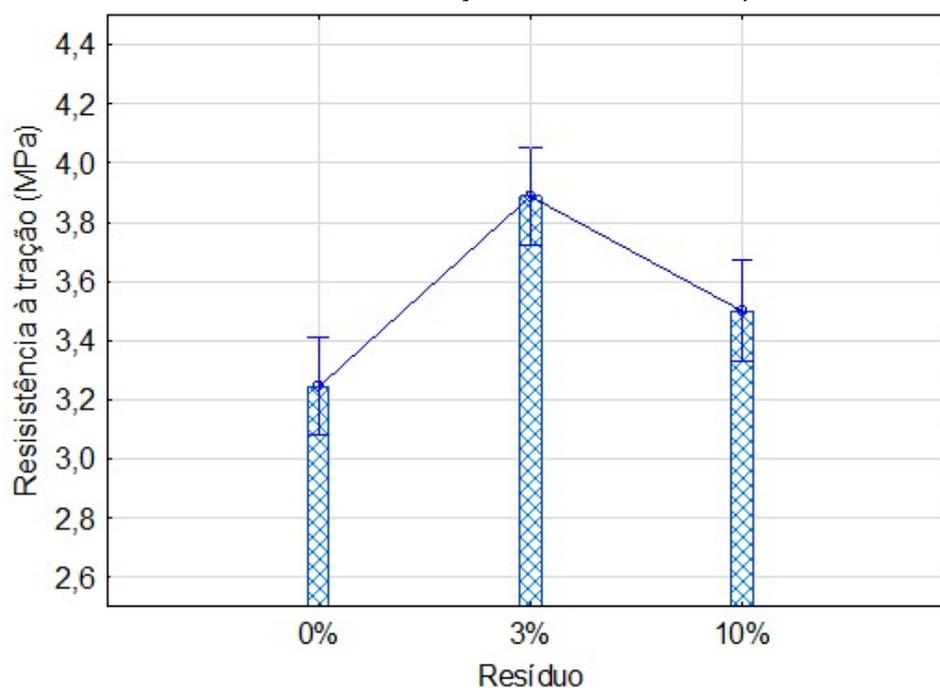
Figura 47 - Gráfico do efeito isolado da variação da relação a/c sobre a média dos resultados de resistência à tração dos concretos com pó de FEA



Fonte: A autora.

A última variável significativa foi a variação do resíduo, e o gráfico é apresentado na Figura 48. Nele é possível perceber um comportamento semelhante ao que foi visto na resistência à compressão, onde o melhor resultado foi visto para o teor de 3% de adição, apesar de o teor de 10% ter se apresentado maior que a referência.

Figura 48 - Gráfico do efeito isolado da variação do percentual de resíduo sobre a média dos resultados de resistência à tração dos concretos com pó de FEA



Fonte: A autora.

Nos estudos de Souza et al. (2010), onde foram feitos concretos com adição de 0%, 10%, 15% e 20% de pó de FEA, os resultados de resistência à tração por compressão diametral mostraram que há um aumento da resistência entre o concreto de referência (0%) e o concreto com 10% de adição, seguido de uma queda para o concreto com 15% de adição e terminando novamente com um aumento quando alcança 20% de adição, ficando próximo ao que foi encontrado no concreto de 10%. Esse resultado, assim como o que é aqui apresentado, confirma que não há um comportamento linear das resistências quando se utiliza o pó de FEA.

Deve-se considerar também, nas análises realizadas, o conteúdo de zinco de cada amostra, pois é ele quem participa de maneira predominante das reações químicas, influenciando nos resultados mecânicos. Na pesquisa de Souza et al. (2010) a amostra de pó de FEA possuía um conteúdo de 10,76% de zinco, enquanto na amostra aqui utilizada o conteúdo é de 19%, o que pode explicar os maiores teores de adição utilizados pelos autores. Nesta análise, assim como na análise da resistência à compressão, o teor ideal para aprimorar a resistência é o de 3%.

Deve-se mencionar também que, considerando que há um aumento na resistência à tração do concreto para os dois teores de adição (em relação ao concreto de

referência), é possível também que o resíduo atue fisicamente na mistura, em especial na zona de transição, densificando a região e aprimorando o desempenho mecânico. Rubio-Cintas et al. (2019) realizaram o ensaio de flexão aos 28 dias em concretos com teores de 5%, 10% e 15% e notaram que, apesar de o valor diminuir com o aumento do teor de resíduo, todas as amostras apresentaram valores superiores à referência, e o teor de 5% apresentou um ganho de 75% de resistência quando comparado com o concreto sem o resíduo. Os autores indicam que o uso do Pó de FEA promove uma diminuição da fissuração do concreto e essa análise se aplica também no ensaio de resistência à tração aqui realizado, confirmando a hipótese de uma zona de transição mais bem ajustada e uma matriz com maior compacidade.

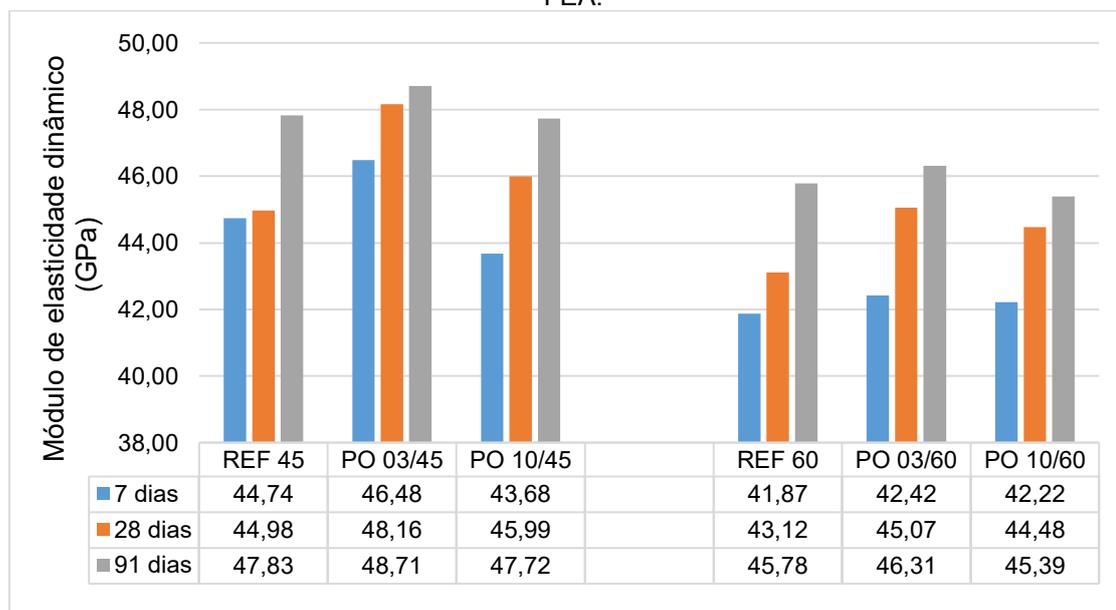
Além disso, Vargas, Masuero e Vilela (2006) analisaram a microestrutura de pastas de cimento com teores de substituição de 5%, 15% e 25% de resíduo em relação à massa do cimento e notaram, pelo ensaio de DRX, que as amostras com o pó de FEA apresentaram picos de Ca(OH)_2 menos intensos quando comparados com a referência tanto com o aumento da incorporação do resíduo como também com o avanço da idade sugerindo um consumo do hidróxido de cálcio pelos compostos do resíduo ao longo do tempo. Essa reação, semelhante a uma reação pozolânica, pode favorecer a zona de transição dos concretos e refletir de forma direta na resistência mecânica, especialmente a resistência à tração.

Além disso, assim como ocorreu na análise de resistência à compressão, entende-se que para as adições de 10% o teor de ar aprisionado também interferiu de forma negativa nos resultados, o que faz com que a queda na resistência não seja uma situação causada pelo resíduo.

5.2.5 Módulo de elasticidade dinâmico

Os valores de módulo de elasticidade dinâmico dos concretos produzidos são apresentados na Figura 49. Nota-se, assim como na resistência à compressão, um aumento do valor do módulo com o aumento da idade em todas as misturas realizadas.

Figura 49 - Resultados do ensaio de módulo de elasticidade dinâmico para as misturas com Pó de FEA.



Fonte: A autora.

De modo a verificar se as variáveis independentes e a interação entre elas exercem influência sobre a variável resposta (módulo de elasticidade dinâmico) em um nível de 95% de confiabilidade, os dados foram tratados no software STATISTICA 10.0 (STATSOFT, 2004) por meio da análise de variância (ANOVA) e os resultados encontrados são apresentados na Tabela 28. Nela é possível verificar que apenas a interação entre o fato idade e percentual de resíduo não foi significativa.

Tabela 28 - Análise de variância do módulo de elasticidade dos concretos com pó de FEA.

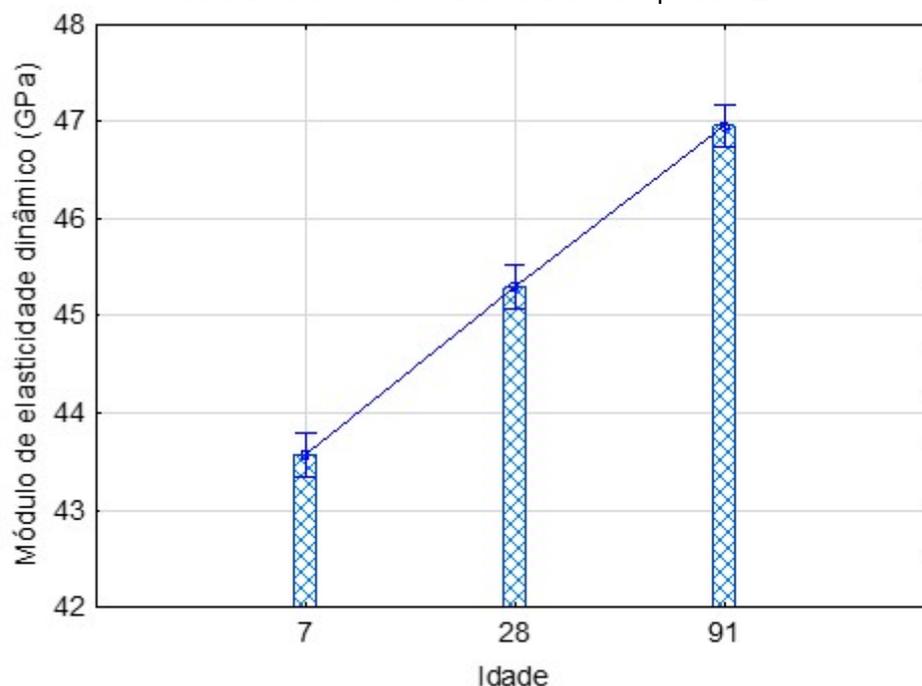
Fatores de variação	Soma dos quadrados	Grau de liberdade	MS	F	P	Significância
Idade	309,8	2	154,9	234	0,000	Sim
Resíduo	69	2	34,5	52,1	0,000	Sim
Relação a/c	233,8	1	233,8	353,3	0,000	Sim
Idade*Resíduo	21,2	4	5,3	8	0,000	Sim
Idade*Relação a/c	3,2	2	1,6	2,4	0,095	Não
Resíduo*Relação a/c	13,9	2	6,9	10,5	0,000	Sim
Idade*Resíduo*Relação a/c	7,9	4	2	3	0,022	Sim
Erro	95,3	144	0,7			

Fonte: A autora.

O comportamento do módulo de elasticidade dinâmico frente ao fator isolado de idade é apresentado na Figura 50. Nele, é possível perceber que ocorre aumento do valor do módulo de elasticidade com a idade, o que está de acordo com o esperado, uma

vez que o processo de cura e hidratação responde pela formação dos compostos hidratados e consequente refinamento dos poros.

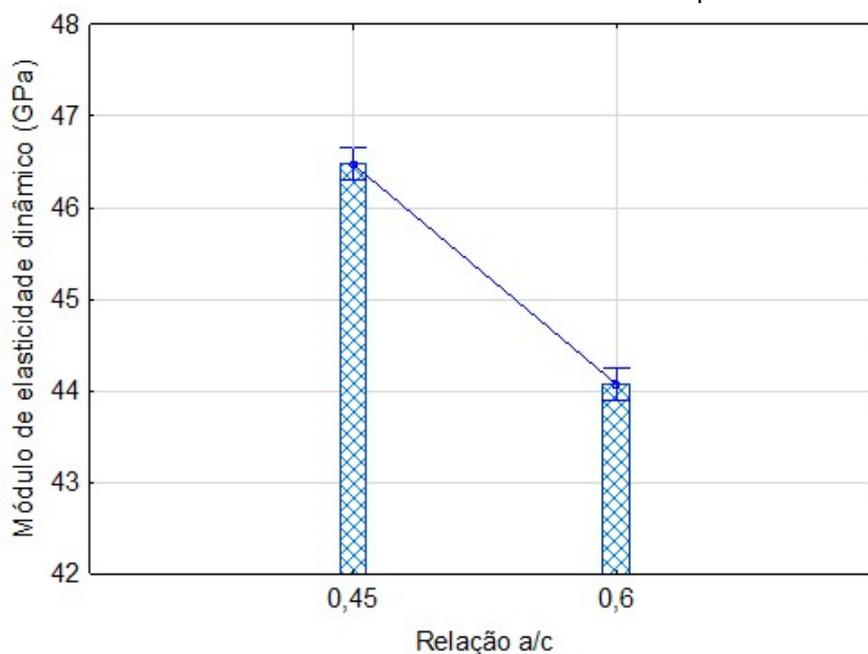
Figura 50 - Gráfico do efeito isolado da variação da idade sobre a média dos resultados de módulo de elasticidade dinâmico dos concretos com pó de FEA



Fonte: A autora.

O comportamento do módulo de elasticidade frente ao fator relação a/c é apresentado na Figura 51. Assim como na idade, a interferência da relação a/c nos valores de módulo de elasticidade são aqueles esperados, onde a relação a/c mais elevada apresenta menores valores de módulo de elasticidade. Considerando que o resultado foi obtido a partir do ensaio de velocidade de propagação de ondas ultrassônicas, deve-se considerar que em relações a/c mais elevadas há um consequente aumento na quantidade de vazios no concreto, em comparação com relações a/c menores. Nestes vazios, as ondas ultrassônicas se propagam de forma mais lenta, o que reflete de maneira direta no resultado do módulo de elasticidade.

Figura 51 - Gráfico do efeito isolado da variação da relação a/c sobre a média dos resultados de módulo de elasticidade dinâmico dos concretos com pó de FEA



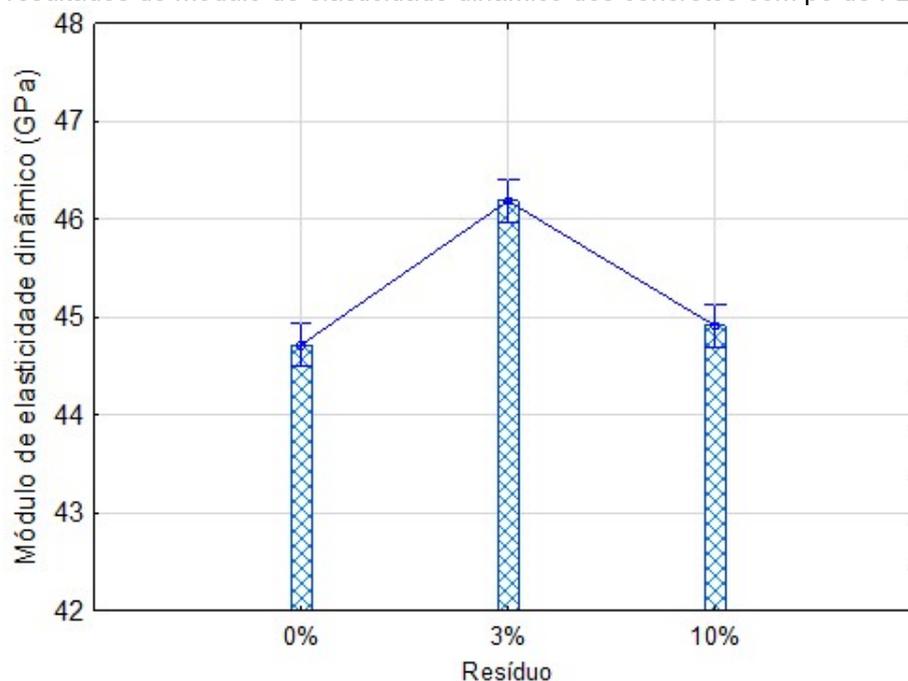
Fonte: A autora.

Em relação à análise do fator isolado do percentual de resíduo, a Figura 52 apresenta os resultados encontrados. Nota-se, assim como na análise da resistência à compressão e à tração, que o percentual de 3% de adição de resíduo foi o que apresentou o melhor desempenho de módulo de elasticidade dinâmico. Mesmo considerando a hipótese de formação de novos compostos hidratados, este comportamento também pode estar atrelado à possibilidade de um efeito físico que o pó de FEA causa no concreto, densificando a matriz.

Além disso, Rubio-Cintas et al. (2019) comparam o desempenho do resíduo com o de nanopartículas que preenchem os vazios da matriz de cimento, promovendo um aumento da compacidade e rigidez do concreto. Essa melhoria reflete de maneira direta no módulo de elasticidade que é um indicativo da rigidez desse material. Os autores ainda indicam seu uso em concretos de alto ou ultra alto desempenho.

Deve-se mencionar ainda o efeito do teor de ar aprisionado para as misturas com 10%, apresentados na Figura 36, que pode ter influenciado no ganho de resistência dos concretos com este teor de adição.

Figura 52 - Gráfico do efeito isolado da variação do percentual de resíduo sobre a média dos resultados de módulo de elasticidade dinâmico dos concretos com pó de FEA



Fonte: A autora.

Para os efeitos combinados, a Figura 53 apresenta o efeito da interação entre a idade e o percentual de resíduo e a Figura 54 apresenta o efeito da interação entre o percentual de resíduo e a relação a/c .

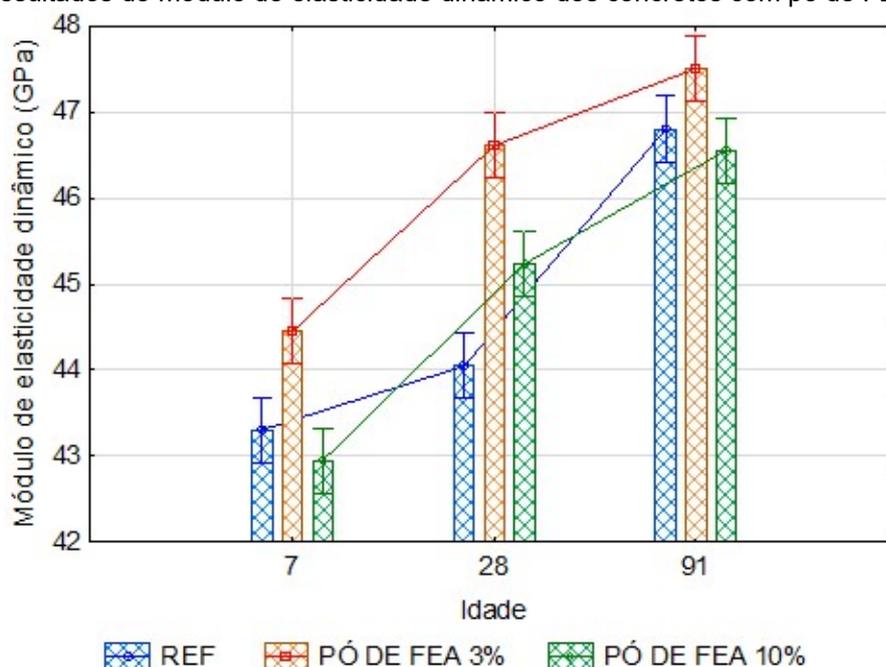
Apesar de existirem alguns fatores com maior relevância na análise do resultado de módulo de elasticidade dinâmico, como a natureza e o diâmetro do agregado graúdo (que responde pela maior fração volumétrica da matriz), os gráficos indicados comprovam que outros fatores também exercem influência significativa sobre esta propriedade. O percentual de incorporação do resíduo de 3% influencia de maneira positiva na pasta cimentícia que, como consequência, apresenta um ganho no seu módulo de elasticidade, resultando também em melhores valores para o concreto.

Essa influência foi identificada nos resultados mecânicos de tração e, principalmente de compressão. Há uma expectativa de atuação química e física do resíduo pois há estudos que indicam a formação de novas fases sólidas hidratadas e estas novas fases são estimuladas também pela elevada finura que o resíduo apresenta, pois ela promove maiores pontos de nucleação que estimulam a formação dos produtos de hidratação (ALIZADEH; MONEMI, 2016).

Na Figura 53 pode-se notar que as misturas com 3% de Pó de FEA aos 28 dias se apresentam muito próximas à mistura de referência aos 91 dias o que indica que a matriz e a zona de transição das misturas estão bem ajustadas. Em relação às misturas com 10% de adição, o benefício da incorporação do resíduo foi mascarado pelo teor de ar aprisionado identificado nos ensaios do estado fresco, comprometendo a análise dos resultados do módulo de elasticidade.

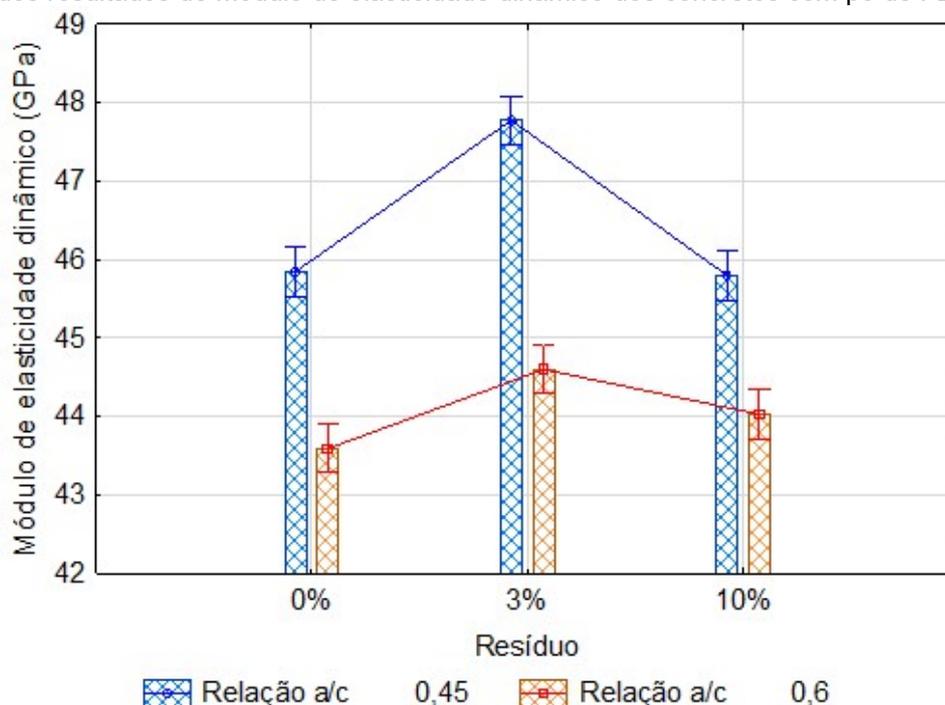
Ainda na Figura 53 nota-se que para as misturas com o resíduo há um ganho de resistência maior entre 7 e 28 dias enquanto para a mistura de referência este aumento no ganho de resistência é mais acentuado entre 28 e 91 dias. Tal comportamento não é característico de um resíduo com atuação pozolânica uma vez que este tipo de reação é mais lento, normalmente após os 28 dias. Assim, há uma possibilidade de atuação semelhante à de um filler por parte do resíduo.

Figura 53 - Gráfico do efeito da interação entre o percentual de resíduo e a idade sobre a média dos resultados de módulo de elasticidade dinâmico dos concretos com pó de FEA.



Fonte: A autora.

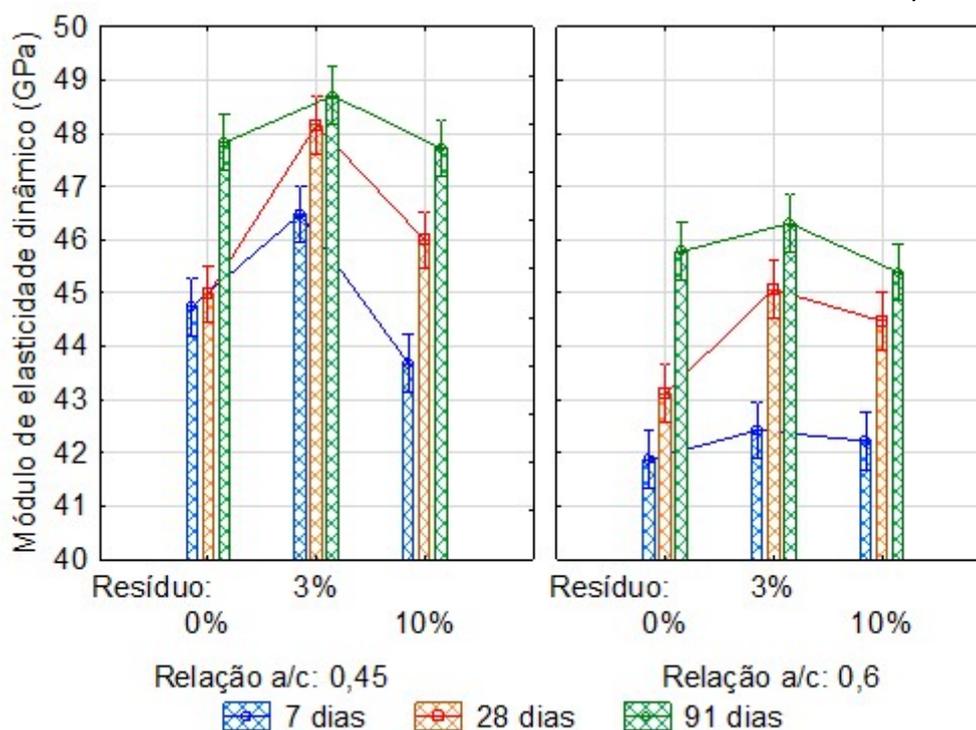
Figura 54 - Gráfico do efeito da interação entre o percentual de resíduo e a relação a/c sobre a média dos resultados de módulo de elasticidade dinâmico dos concretos com pó de FEA.



Fonte: A autora.

Por fim, a Figura 55 apresenta o resultado da interação entre a idade, a relação a/c e o percentual de resíduo. É importante mencionar que, além da possibilidade de efeito fíler mencionado anteriormente, há estudos que indicam que o resíduo contribui na formação de produtos hidratados. De fato, os estudos de Fares et al. (2016) indicam, por meio das micrografias eletrônicas de varredura e outros ensaios que, ao incorporar o resíduo em teores que variam de 0% a 3%, ocorre progressiva diminuição de cristais de etringita e maior refinamento dos poros da mistura, além de atribuírem o ganho de resistência à formação do hemimorfito ZSH, que possui boas propriedades mecânicas. Todos esses fatores respondem, de maneira direta, no desempenho do módulo de elasticidade dinâmico aqui apresentado, com comportamento semelhante ao apresentado para as resistências mecânicas.

Figura 55 - Gráfico do efeito da interação entre o percentual de resíduo, a relação a/c e a idade sobre a média dos resultados de módulo de elasticidade dinâmico dos concretos com pó de FEA.

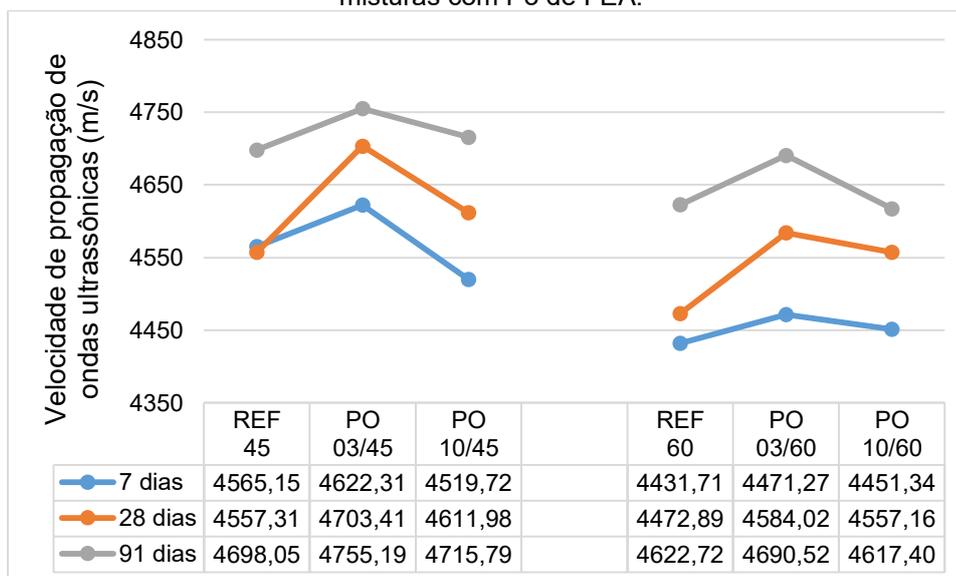


Fonte: A autora.

É interessante analisar também os resultados de velocidade de propagação de ondas ultrassônicas. Neste resultado é possível perceber que há um comportamento idêntico ao visto para o módulo de elasticidade, o que indica que de fato há uma relação direta entre a velocidade de propagação de ondas ultrassônicas e o módulo de elasticidade dinâmico. Esse resultado do ensaio de ultrassom é particularmente importante para verificar as condições de empacotamento das misturas. A Figura 56 apresenta os resultados encontrados para as misturas realizadas e a Tabela 29 apresenta uma classificação que relaciona a qualidade dos concretos com a velocidade de onda ultrassônica.

Nota-se que, para as misturas com relação a/c de 0,45, todas as idades apresentaram velocidade de propagação de ondas dentro da classificação de excelente. Para as relações a/c de 0,6 a classificação aos 7 dias de todas as misturas foi ótima, assim como a mistura REF60 aos 28 dias. Para as demais, a classificação foi excelente.

Figura 56 - Resultados do ensaio de velocidade de propagação de ondas ultrassônicas para as misturas com Pó de FEA.



Fonte: A autora.

Tabela 29 - Correlação entre velocidade de onda ultra-sônica e a qualidade do concreto

Velocidade de onda ultra-sônica (m/s)	Qualidade do concreto
$V > 4500$	Excelente
$3500 < V < 4500$	Ótimo
$3000 < V < 3500$	Bom
$2000 < V < 3000$	Regular
$V > 2000$	Ruim

Fonte: Whitehurst (1966) e Rincon et al. (1998).

Estes resultados mostram que as misturas apresentam um bom grau de empacotamento e confirmam o que foi visto para o resultado de resistência à compressão, uma vez que altas velocidades estão associadas com alto valor de resistência.

O comportamento semelhante ao de resistência à compressão e do módulo de elasticidade evidenciam uma seguridade das análises feitas. O declínio nos teores de 10% em relação aos teores de 3% foi muito baixo em todas as idades e sua ocorrência é dada, possivelmente, ao teor de ar aprisionado das misturas com 10% de resíduo apresentado na Figura 36, que aumentou a quantidade de falhas internas, impactando na velocidade da onda ultrassônica, apesar de ainda se manterem superiores aos da referência, exceto as misturas com relação a/c 0,45 na idade de 7 dias.

Apesar disso, analisando cada mistura de forma isolada percebe-se que houve aumento do valor da velocidade com o aumento da idade, o que indica que há um progresso na densificação da matriz de concreto.

5.2.6 Avaliação ambiental

A avaliação ambiental, feita por meio da análise do extrato lixiviado das amostras é apresentada na Tabela 30. É importante mencionar que o Pó de FEA é classificado como Classe I – Perigoso pela NBR 10.004 (ABNT, 2004a) e o ensaio de lixiviação do concreto é uma forma de avaliar a capacidade desse material em encapsular os metais presentes no resíduo e assim verificar se o uso do resíduo é seguro do ponto de vista ambiental. Os resultados apresentados são relativos ao somatório dos ciclos de lixiviação feitos durante 64 dias e expressos em miligramas por metro quadrado do corpo de prova.

Tabela 30 - Lixiviação acumulada nos concretos produzidos com adição de Pó de FEA (mg/m²)

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

Fonte: A autora.

Pelos valores encontrados nota-se que nenhuma mistura apresentou elementos excedentes aos parâmetros de U1 indicados na norma NEN 7375 (NNI, 2004). Isso indica que o uso do Pó de FEA em blocos monolíticos de concreto é seguro do ponto de vista ambiental.

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

Nos estudos de Ledesma et al. (2018) foi avaliada a lixiviação de argamassas por um período de 24h, as amostras ficam imersas em água deionizada sendo filtradas após este período. Das argamassas analisadas, nenhuma pode ser classificada como resíduo não perigoso em razão da alta liberação de Chumbo. Os autores explicam que este elemento, em meio básico (pH superior a 12 que é o de matrizes cimentícias), tem sua liberação favorecida, justificando os resultados encontrados. Entretanto, ainda assim, houve redução significativa dos níveis de liberação dos elementos quando comparados com a avaliação do resíduo puro, granular. Deve-se considerar também os altos níveis de substituição do resíduo usado pelos autores, próximo a 30%.

Nas condições realizadas nesta pesquisa, com níveis de adição de 3% e 10% pode-se notar que apenas na mistura PO 10/60 o chumbo apresentou valores mais elevados ainda que abaixo dos limites. Tal comportamento pode ser atribuído ao pH da mistura que ficou entre 8,6 e 12,5, não alcançando valores ainda mais básicos que poderiam ter favorecido sua mobilização acima dos limites. Assim, todas as misturas produzidas são seguras do ponto de vista ambiental, não apresentando restrições ao uso.

Pelos resultados apresentados, nota-se que, de maneira generalizada, a relação a/c não exerceu influência significativa na liberação dos metais, exceto para os elementos Chumbo, Zinco e Cádmio que apresentaram valores superiores de liberação para a relação a/c 0,6. De acordo com Jochem (2017) menores relações a/c produzem estruturas mais compactas, com poros capilares mais finos, reduzindo assim a absorção e permeabilidade, contribuindo também no aprisionamento dos metais na matriz. Tal situação justifica o que foi aqui encontrado para estes elementos: maiores valores de lixiviação para maiores relações a/c.

Jochem (2017) atribuiu, em sua pesquisa, a baixa lixiviação de alguns metais à sua imobilização na estrutura CSH pois ela é uma fase resistente à lixiviação. Em relação ao Chumbo e, de maneira especial ao Zinco, deve-se considerar a hipótese de que eles contribuem na formação de compostos hidratados com estrutura semelhante à do CSH que pode ter contribuído para o encapsulamento destes metais.

5.3 RESULTADOS DOS CONCRETOS COM TERRA DE SHREDDER

Os resultados dos concretos com a Terra de Shredder, tanto no estado fresco, quanto no estado endurecido, são apresentados a seguir. No estado fresco, a



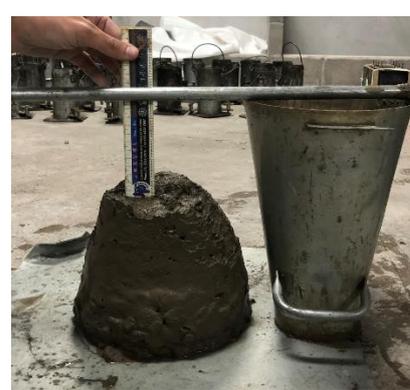
REF 45



TS 03/45



TS10/45



Fonte: A autora.

Apesar dos grãos do resíduo terem se apresentado angulosos e irregulares após o processo de moagem, essa morfologia não prejudicou a trabalhabilidade dos concretos. Pelo contrário, houve aumento dos valores de abatimento, o que pode ser atribuído à finura muito próxima à do cimento Portland, fazendo com que essa característica predominasse sobre o formato dos grãos.

É importante mencionar que a NBR 8953 (ABNT, 2015) estabelece classificações para a consistência dos concretos com fins estruturais. As misturas aqui investigadas ficam dentro das classificações S50, S100 e S160. A Tabela 31 indica as classificações das misturas e as aplicações típicas extraídas da norma.

Tabela 31 - Classificação dos concretos de acordo com a NBR 893 (ABNT, 2015)

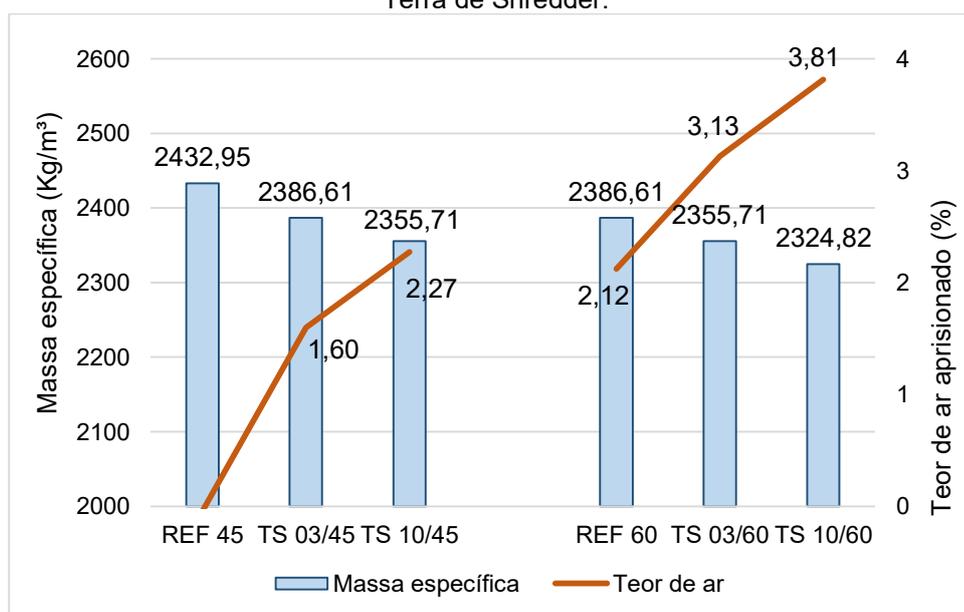
Mistura	Classe	Aplicações típicas
REF 60	S50 ($50 \leq A < 100$)	Alguns tipos de pavimentos e de elementos de fundação
REF 45	S100 ($100 \leq A < 160$)	Elementos estruturais, com lançamento convencional do concreto
TS 03/45		
TS 10/45		
TS 03/60	S160 ($160 \leq A < 220$)	Elementos estruturais com lançamento bombeado do concreto
TS 10/60		

Fonte: A autora.

5.3.2 Massa específica dos concretos e teor de ar aprisionado

Os concretos com a Terra de Shredder apresentaram uma queda nos valores de massa específica, apesar da pouca diferença entre as misturas, como pode ser percebido na Figura 59. Deve-se considerar que a massa específica do resíduo é de $2,85 \text{ g/cm}^3$ e do cimento $3,10 \text{ g/cm}^3$, conforme mencionado no item 5.1.2.1, fazendo com que, de fato, haja um declínio nos valores de massa específica, uma vez que parte do volume está sendo ocupado por um material de densidade menor que a do cimento. Aliado a isso, é importante notar que houve aumento do teor de ar aprisionado, contribuindo ainda mais para a queda dos valores de massa específica. Esses valores do teor de ar aprisionado são atribuídos ao processo de moldagem dos corpos de prova, que foi feito de maneira manual, provocando a entrada de ar durante o adensamento.

Figura 59 - Resultados do ensaio de massa específica e teor de ar aprisionado para as misturas com Terra de Shredder.



Fonte: A autora.

Apesar desses fatores, a diferença dos valores de massa específica foi pequena, insuficiente para colocar os resultados fora do que é encontrado nas revisões bibliográficas. Dietrich (2015) e Soares (2014) também realizaram ensaios de massa específica em concretos com incorporação de resíduos de rochas ornamentais e todos os valores se apresentaram entre 2300 e 2550 kg/m^3 . As autoras também verificaram ligeira queda nos valores de massa específica quando ocorreu a incorporação dos

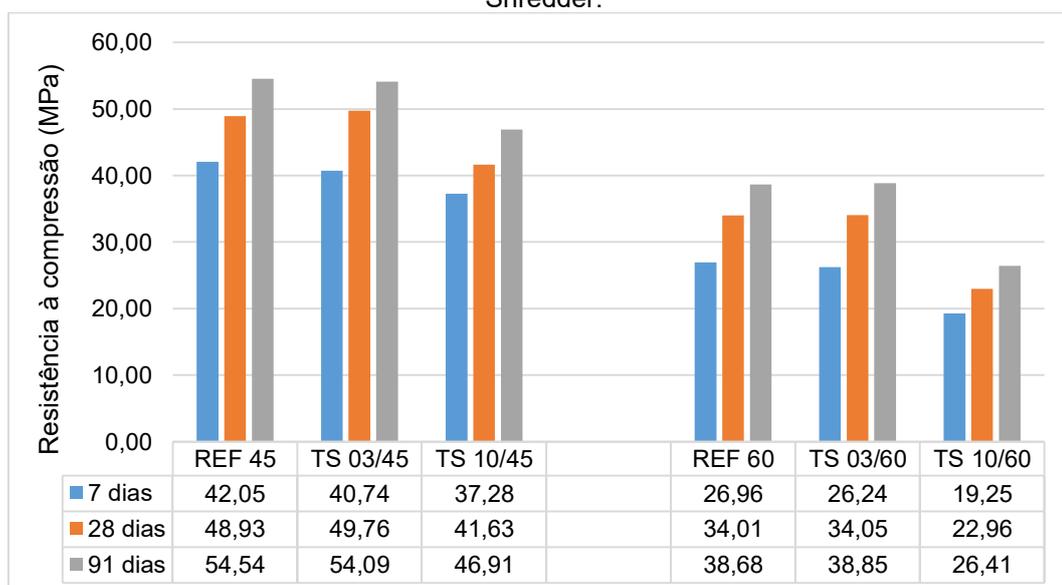
resíduos, o que foi atribuído ao processo de adensamento manual (que apresenta mais possibilidade de imprecisão quando comparado com métodos mecanizados), permitindo a entrada de bolhas de ar durante os golpes nas formas dos corpos de prova, assim como ocorreu nesta pesquisa.

5.3.3 Resistência à compressão axial

Os resultados encontrados para as misturas de referência e com o resíduo são apresentados na Figura 60. Nela é possível perceber que, conforme já se espera, houve aumento das resistências dos concretos com o tempo para todas as misturas e para as duas relações a/c avaliadas.

Também é possível perceber que houve redução dos valores de resistência à compressão quando o resíduo foi incorporado, especialmente para a adição de 10%.

Figura 60 - Resultados do ensaio de resistência à compressão axial para as misturas com a Terra de Shredder.



Fonte: A autora.

De modo a comprovar que as variáveis independentes e a interação entre elas exercem influência sobre a variável resposta (resistência à compressão axial) em um nível de 95% de confiabilidade, os dados foram tratados no software STATISTICA 10.0 (STATSOFT, 2004) por meio da análise de variância (ANOVA) e os resultados encontrados são apresentados na Tabela 32.

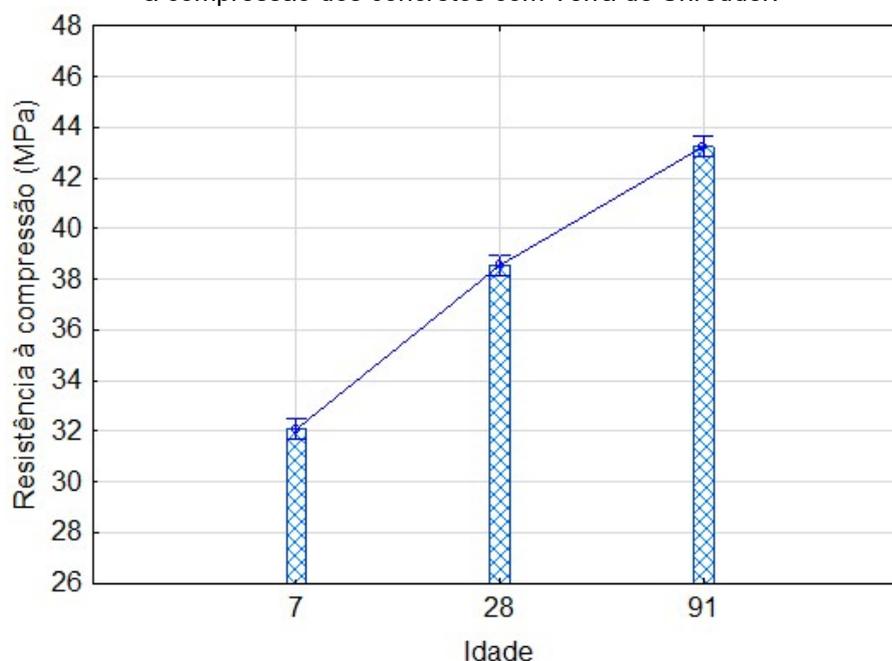
Tabela 32 - Análise de variância da resistência à compressão dos concretos com Terra de Shredder.

Fatores de variação	Soma dos quadrados	Grau de liberdade	MS	F	P	Significância
Idade	1883	2	941	780	0,000	Sim
Resíduo	1390	2	695	576	0,000	Sim
Relação a/c	6127	1	6127	5074	0,000	Sim
Idade*Resíduo	74	4	18	15	0,000	Sim
Idade*Relação a/c	7	2	3	3	0,071	Não
Resíduo*Relação a/c	74	2	37	31	0,000	Sim
Idade*Resíduo*Relação a/c	5	4	1	1	0,433	Não
Erro	86,9	72	1,2			

Fonte: A autora.

Nas Figura 61 e Figura 62 são apresentados os gráficos dos efeitos isolados da idade e da relação a/c sobre a resistência à compressão dos concretos. Na Figura 61 nota-se que houve aumento da resistência com a idade, o que está de acordo com o que se espera, uma vez que há progresso de hidratação com o tempo e consequente refinamento dos poros.

Figura 61 - Gráfico do efeito isolado da variação da idade sobre a média dos resultados de resistência à compressão dos concretos com Terra de Shredder.

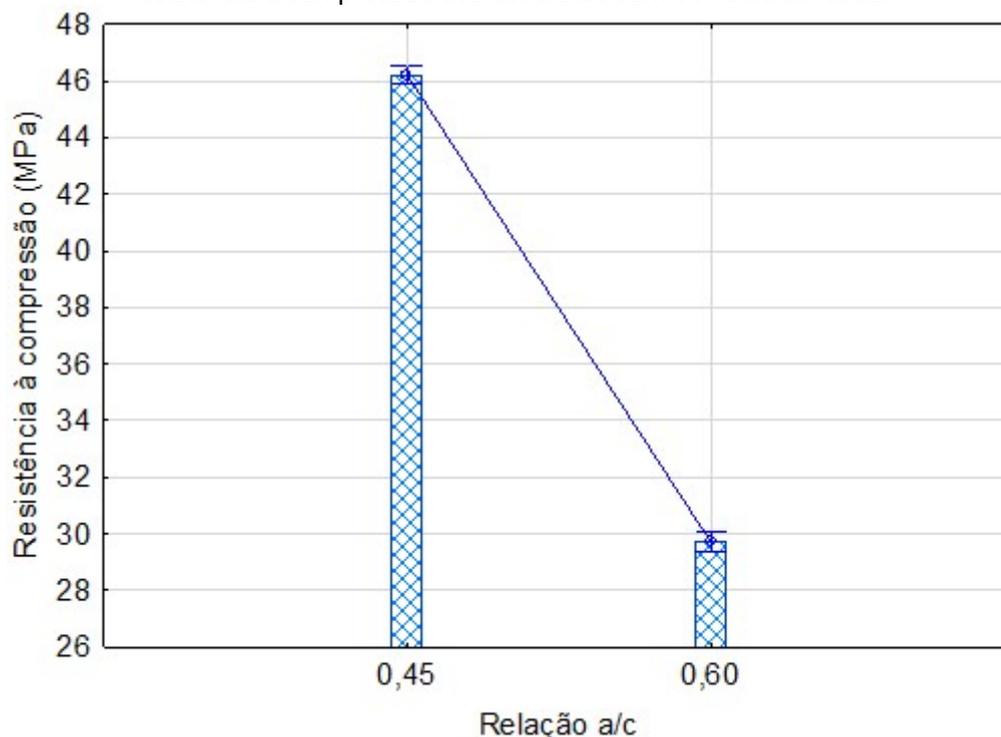


Fonte: A autora.

Na Figura 62 é possível observar também mais um comportamento esperado das matrizes de cimento: menores valores de resistência para as maiores relações a/c.

Tal fato ocorre, pois, uma relação a/c mais elevada ocasiona um considerável volume de poros preenchidos com água, que são consideradas fases não resistentes.

Figura 62 - Gráfico do efeito isolado da variação da relação a/c sobre a média dos resultados de resistência à compressão dos concretos com Terra de Shredder.



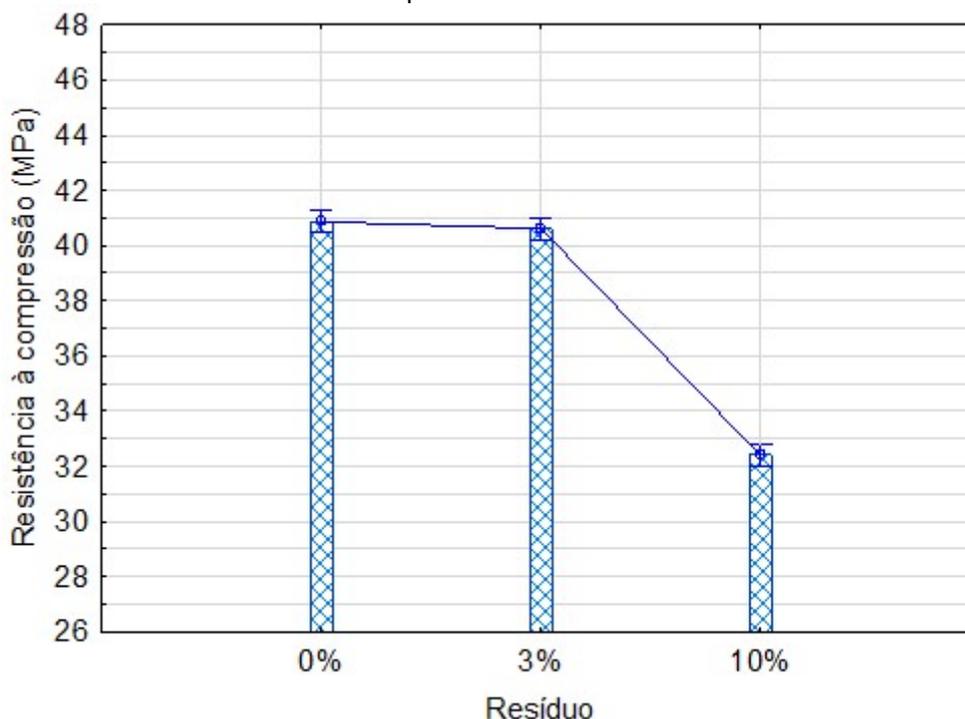
Fonte: A autora.

A Figura 63 apresenta o gráfico do efeito isolado do percentual de resíduo sobre a resistência à compressão dos concretos. A adição de resíduo provoca queda desse parâmetro, especialmente para o teor de 10%.

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

Deve-se mencionar, assim como ocorreu com os resultados dos concretos com Pó de FEA, que as misturas com 10% de adição de resíduo apresentaram um teor de ar aprisionado mais elevado que as demais misturas, conforme apresentado na Figura 59, o que pode ter contribuído no declínio mais acentuado da resistência à compressão das misturas com essa porcentagem.

Figura 63 - Gráfico do efeito isolado da variação do percentual de resíduo sobre a média dos resultados de resistência à compressão dos concretos com Terra de Shredder.



Fonte: A autora.

O resultado da interação dos fatores da idade e do percentual de resíduo é apresentado na Figura 64. Nota-se que há um comportamento que se repete em relação à incorporação do resíduo, onde os concretos com 3% de adição se apresentam muito próximos à referência e os concretos com 10% de adição apresentam forte declínio nos valores da resistência.

Tal resultado indica que o resíduo não contribui no ganho de resistência mecânica dos concretos. Esse comportamento pode estar relacionado à heterogeneidade do resíduo, com um alto índice de matéria orgânica, estimado pelo elevado valor encontrado para a perda ao fogo (13,4%). Esse valor se dá pela predominância de materiais como solo/areia, plásticos, têxteis e borrachas no resíduo, identificados pela classificação visual que alguns autores realizam (VERMEULEN et al., 2011) e que não contribuem na formação de produtos hidratados, apesar da grande disponibilidade de quartzo na amostra. Então, diante disso, apesar de existir a predominância de SiO_2 no resíduo, não se trata de um resíduo com elevado grau de pureza, visto pelos outros elementos químicos presentes e pela elevada perda ao fogo e também não há característica amorfa, visto pelo resultado de DRX.

Figura 64 - Gráfico do efeito da interação entre o percentual de resíduo e a idade sobre a média dos resultados de resistência à compressão dos concretos com Terra de Shredder.



Fonte: A autora.

É importante informar que, assim como outros autores fazem a classificação visual do resíduo, nesta pesquisa também foi possível identificar objetos plásticos, resíduos de equipamentos eletrônicos, espuma, materiais terrosos e areia, como mostra a Figura 65, confirmando a falta de pureza do resíduo pela heterogeneidade que ele apresenta em sua composição, mesmo passando pelo processo de peneiramento e eliminando grande parte dos objetos de maior dimensão.

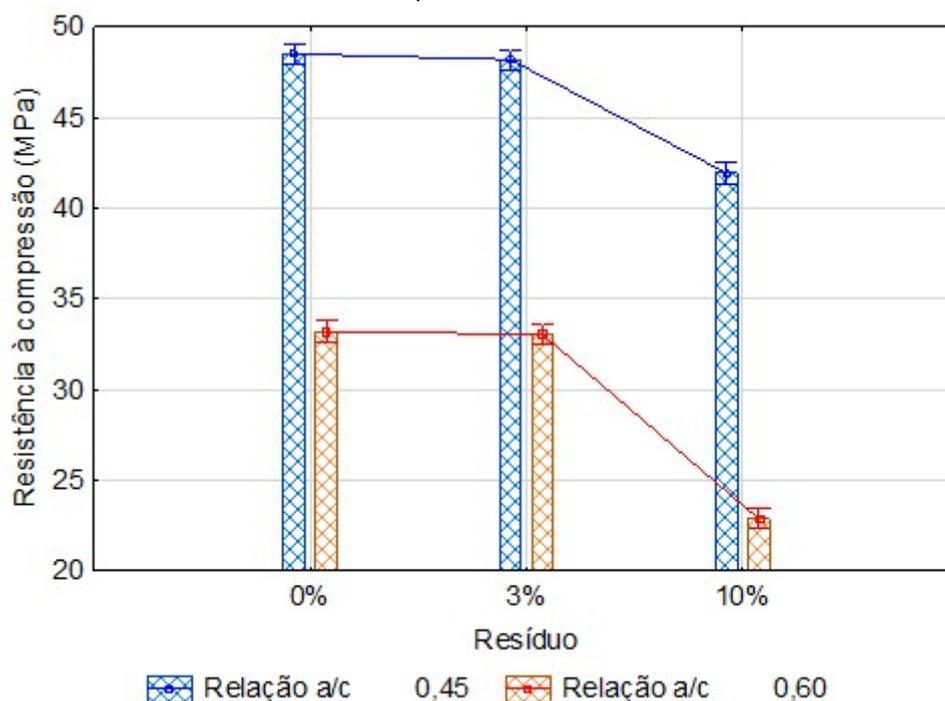
Figura 65 - Objetos encontrados no resíduo antes de passar pelo processo de peneiramento na malha de 4,8 mm.



Fonte: A autora.

Na Figura 66 é apresentado o resultado da interação entre o percentual de resíduo e a relação a/c sobre os resultados de resistência à compressão. Nota-se que o resíduo não interfere no comportamento esperado da relação a/c e os maiores valores são aqueles do menor conteúdo de água. Em relação ao percentual de resíduo, como já mencionado, não há grande interferência para 3% de adição enquanto a adição de 10% do resíduo impacta de maneira acentuada desfavoravelmente, especialmente para as misturas com relação a/c 0,60.

Figura 66 - Gráfico do efeito da interação entre o percentual de resíduo e a relação a/c sobre a média dos resultados de resistência à compressão dos concretos com Terra de Shredder.



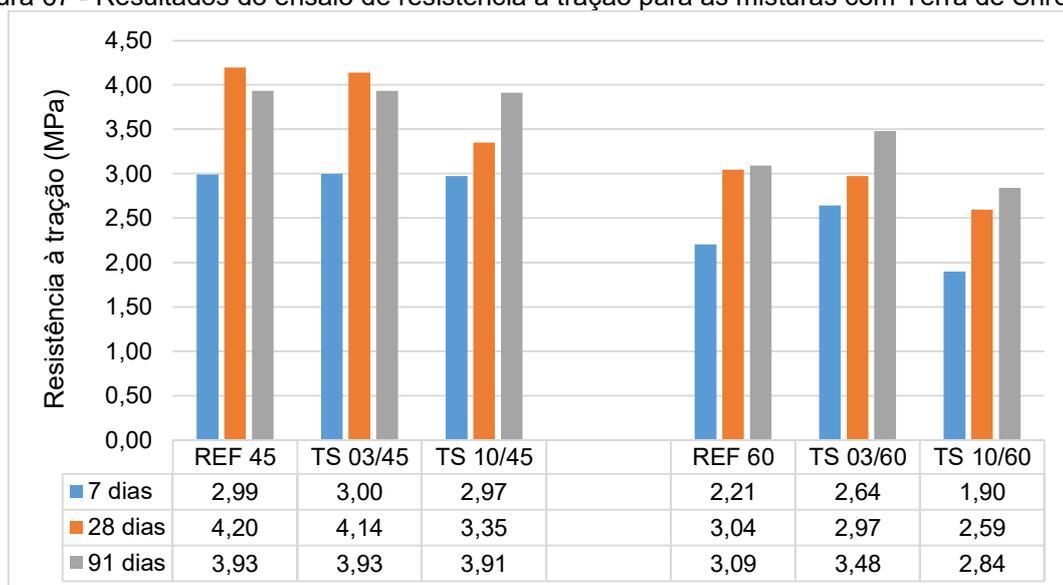
Fonte: A autora.

5.3.4 Resistência à tração por compressão diametral

Os resultados encontrados para a propriedade de resistência à tração na compressão diametral são apresentados na Figura 67. O intervalo de variação dos valores foi de 1,90 MPa até 4,20 MPa.

De modo a comprovar que as variáveis independentes e a interação entre elas exercem influência sobre a variável resposta (resistência à tração na compressão diametral) em um nível de 95% de confiabilidade, os dados foram tratados no software STATISTICA 10.0 (STATSOFT, 2004) por meio da análise de variância (ANOVA) e os resultados encontrados são apresentados na Tabela 33.

Figura 67 - Resultados do ensaio de resistência à tração para as misturas com Terra de Shredder.



Fonte: A autora.

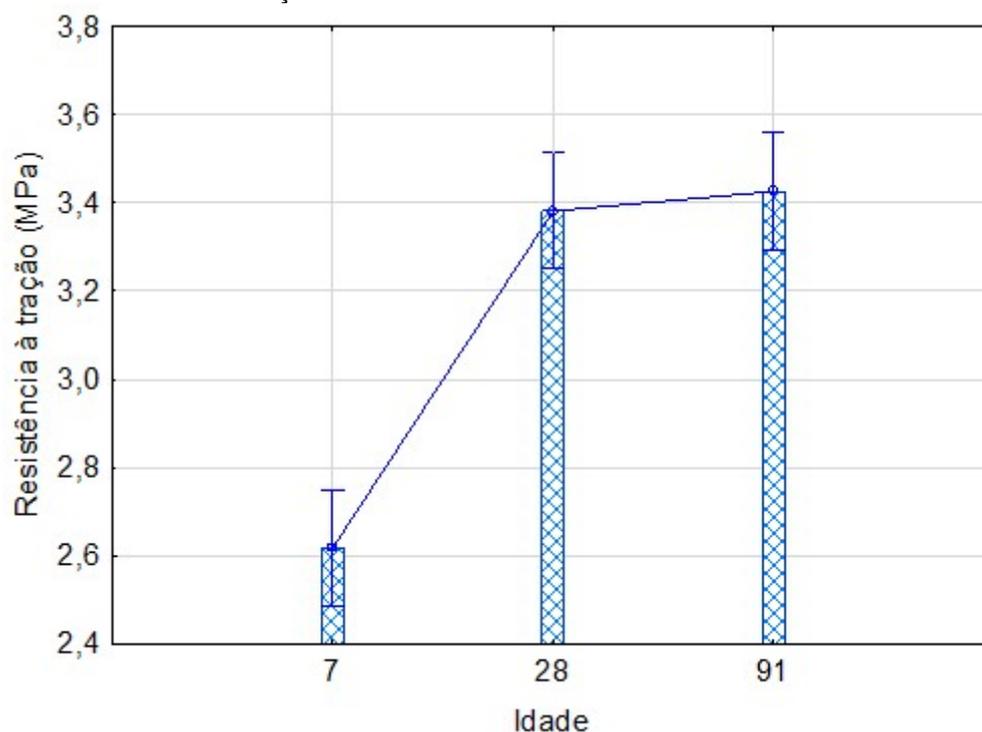
Tabela 33 - Análise de variância da resistência à tração dos concretos com Terra de Shredder.

Fatores de variação	Soma dos quadrados	Grau de liberdade	MS	F	P	Significância
Idade	9,93	2	4,96	47,7	0,000	Sim
Resíduo	1,66	2	0,83	8	0,001	Sim
Relação a/c	10,96	1	10,96	105,3	0,000	Sim
Idade*Resíduo	1,06	4	0,26	2,5	0,05	Não
Idade*Relação a/c	0,62	2	0,31	3	0,06	Não
Resíduo*Relação a/c	1	2	0,5	4,8	0,012	Sim
Idade*Resíduo*Relação a/c	1,51	4	0,38	3,6	0,011	Sim
Erro	5,6216	54	0,1041			

Fonte: A autora.

O gráfico do fator isolado da idade é apresentado na Figura 68. Nota-se que há um elevado crescimento entre as idades de 7 e 28 dias seguido de um comportamento de estabilidade para a idade de 91 dias. Tal situação está de acordo com o que a literatura indica, onde, nas análises de resistência à tração, após um mês de cura, esta propriedade aumenta mais lentamente quando comparada com a resistência à compressão (MEHTA; MONTEIRO, 2014). Comprovando que este comportamento está atrelado às características intrínsecas da propriedade de resistência à tração, nota-se que os resultados encontrados para os concretos com o Pó de FEA seguiram o mesmo comportamento.

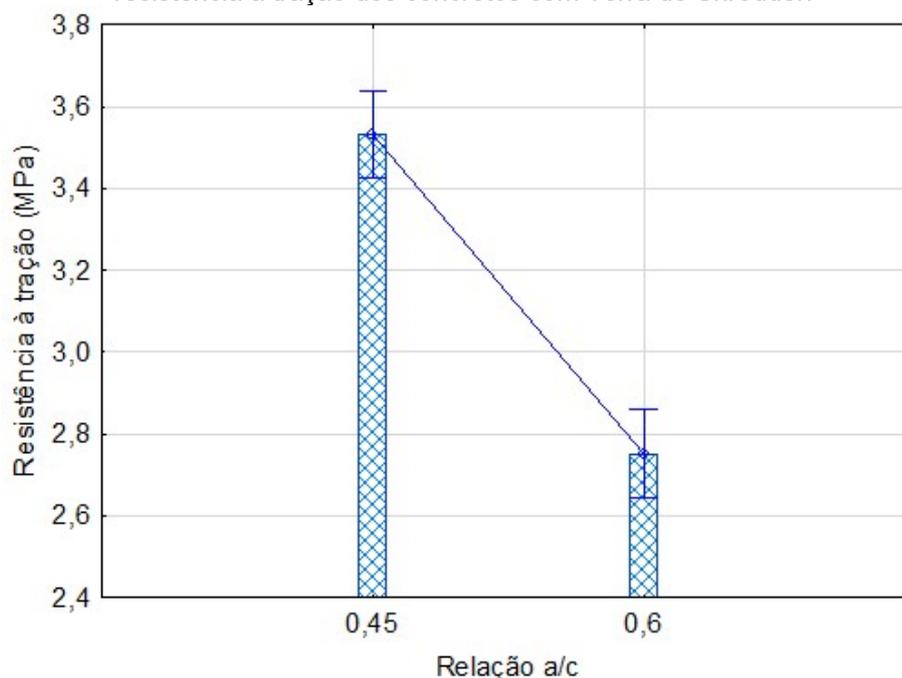
Figura 68 - Gráfico do efeito isolado da variação da idade sobre a média dos resultados de resistência à tração dos concretos com Terra de Shredder.



Fonte: A autora.

Na Figura 69 é apresentado o gráfico do efeito isolado da relação a/c sobre a média dos valores de resistência à tração. Assim como em todas as outras análises, é possível perceber que o resíduo não interfere no comportamento esperado dos concretos, onde os maiores valores de resistência são aqueles atribuídos às misturas com menor relação a/c.

Figura 69 - Gráfico do efeito isolado da variação da relação a/c sobre a média dos resultados de resistência à tração dos concretos com Terra de Shredder.



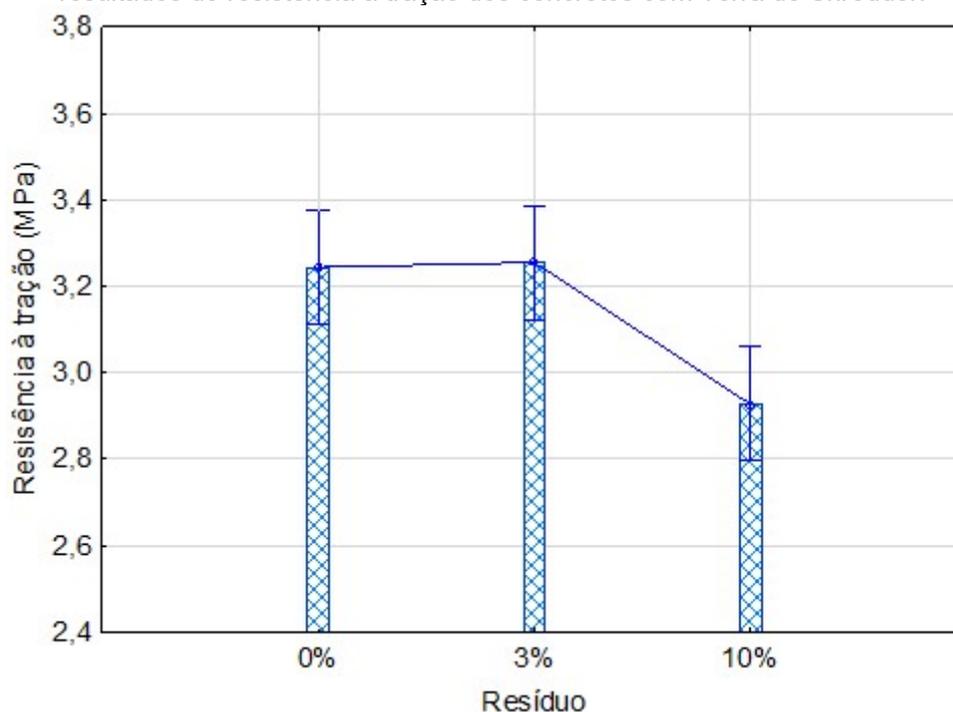
Fonte: A autora.

O último fator isolado que foi significativo foi o percentual de resíduo, e o gráfico é apresentado na Figura 70. Assim como na análise da resistência à compressão, nota-se que a incorporação de 3% apresenta pouca influência sobre os resultados, entretanto, quando aumenta o percentual para 10% há uma queda mais acentuada nos valores desta propriedade indicando o efeito negativo que o resíduo causa no concreto.

Deve-se mencionar novamente o impacto do teor de ar aprisionado das misturas com 10% de resíduo, conforme apresentado na Figura 59, o que pode ter contribuído na zona de transição dos concretos, tornando-a mais fragilizada, impactando de forma direta nos resultados de resistência à tração.

Outro ponto a ser considerado, assim como foi explicado anteriormente, é a heterogeneidade do resíduo que, apesar de ser rico em quartzo, apresenta uma composição química muito diversificada e também um elevado teor de matéria orgânica, presumido pelo resultado encontrado para a perda ao fogo. Estas características do resíduo são atribuídas ao seu próprio processo de geração onde há um aproveitamento da fração metálica ferrosa das sucatas enquanto todo o restante de material compõe a Terra de Shredder.

Figura 70 - Gráfico do efeito isolado da variação do percentual de resíduo sobre a média dos resultados de resistência à tração dos concretos com Terra de Shredder.

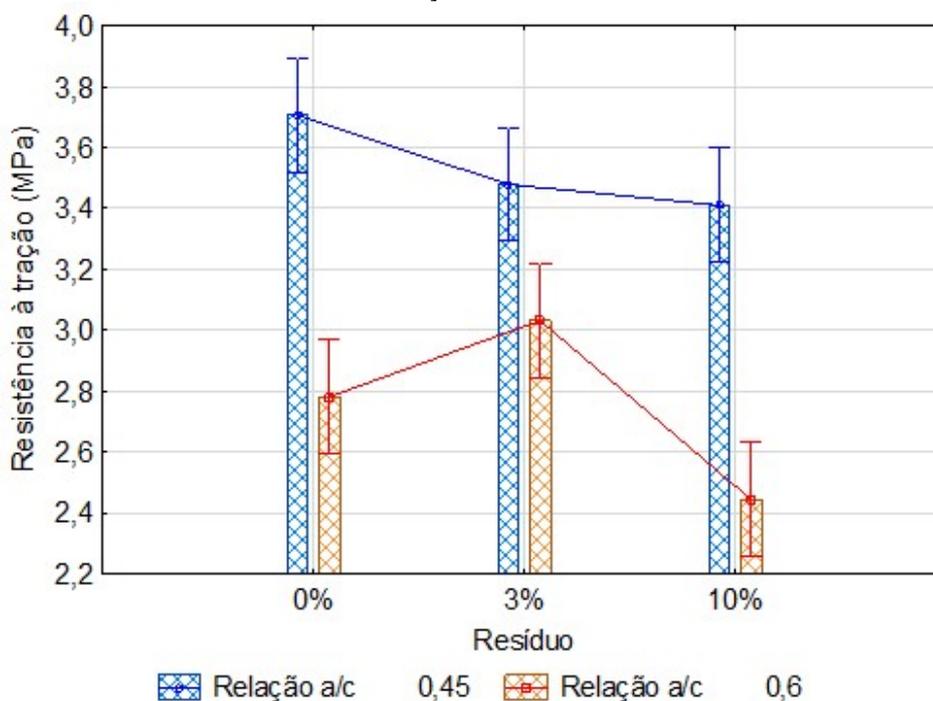


Fonte: A autora.

O resultado da interação entre o resíduo e a relação a/c é apresentado na Figura 71. Nele é possível perceber que, apesar de se manter os menores resultados para a adição de 10%, há um comportamento diferente para as duas relações a/c analisadas. Enquanto na relação a/c de 0,6 há um declínio da resistência com o aumento da adição, na relação a/c de 0,45 há um aumento nesta propriedade com a incorporação de 3% e consequente redução.

É importante mencionar que os resultados de resistência à tração estão mais suscetíveis a outras influências não controladas como o melhor posicionamento do corpo de prova na prensa, o correto encaixe dos corpos de prova com o filete de madeira e o baixo carregamento da prensa, necessário em virtude do comportamento frágil do concreto nesta propriedade. Todos estes fatores contribuem de maneira direta no bom desempenho do resultado.

Figura 71 - Gráfico do efeito da interação entre a relação a/c e o percentual de resíduo sobre a média dos resultados de resistência à tração dos concretos com Terra de Shredder.



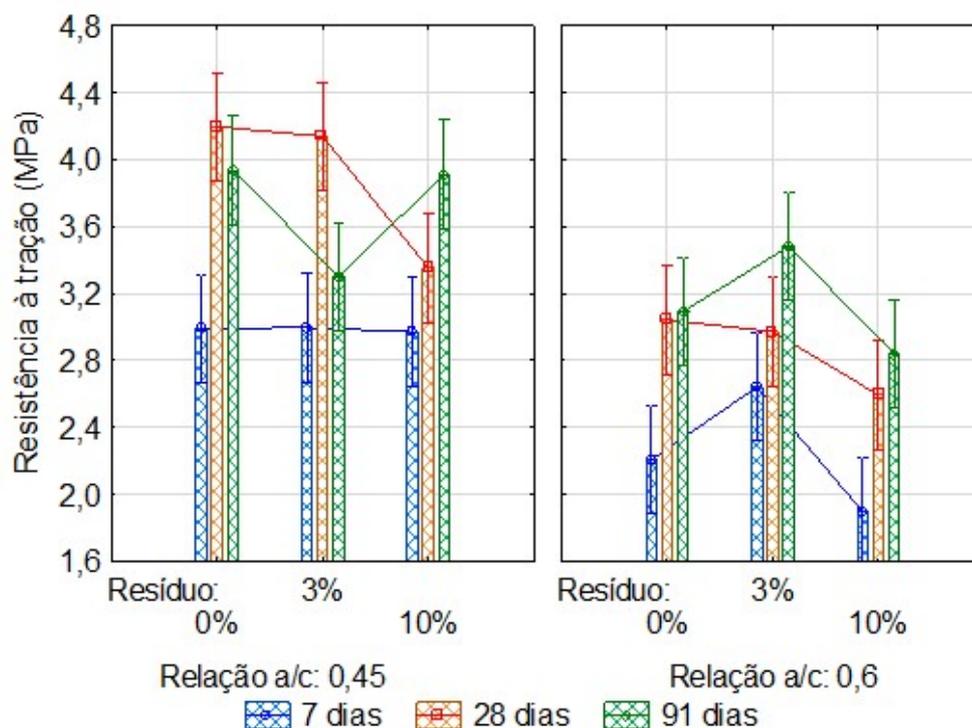
Fonte: A autora.

Por fim, o resultado da interação tripla é apresentado na Figura 72. Nela, nota-se que há comportamento diferente para as misturas com relação a/c de 0,45 e 0,60. No primeiro grupo, aos 7 dias praticamente não há alteração de resultados para as diferentes misturas enquanto aos 28 dias há um decréscimo de valor para a incorporação de 10% e aos 91 dias este decréscimo se destaca para a incorporação de 3%.

Já no grupo das misturas com relação a/c de 0,60 nota-se um comportamento mais uniforme, onde as misturas com incorporação de 10% de resíduo apresentaram menores valores de resistência à tração em todas as idades.

Mais uma vez, os resultados encontrados devem ser analisados considerando a grande variabilidade que este ensaio proporciona e o comportamento frágil do concreto quando submetido a esforços de tração.

Figura 72 - Gráfico do efeito da interação entre o percentual de resíduo, a relação a/c e a idade sobre a média dos resultados de resistência à tração dos concretos com Terra de Shredder.

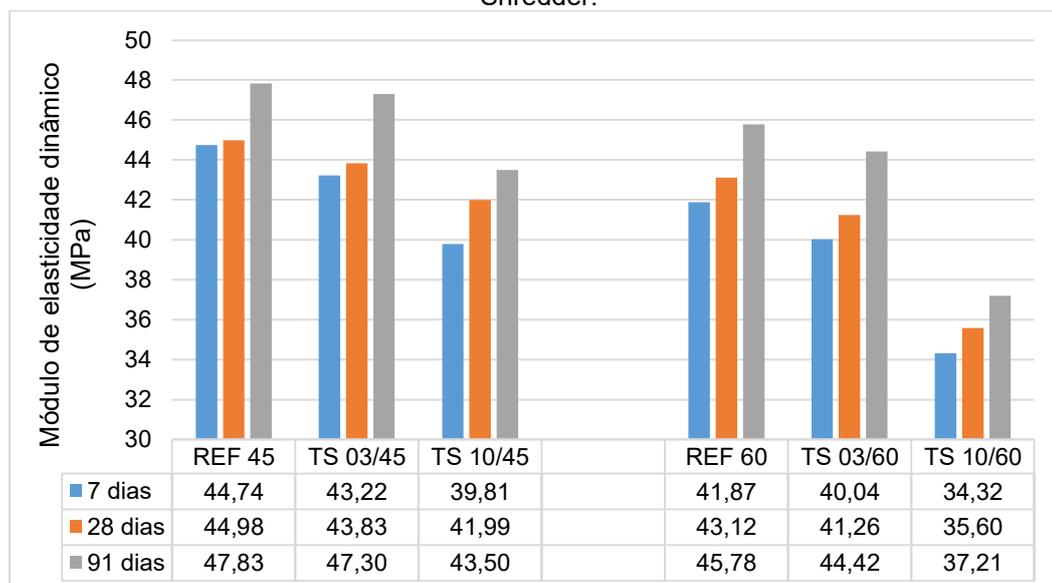


Fonte: A autora.

5.3.5 Módulo de elasticidade dinâmico

Os resultados encontrados para a propriedade de módulo de elasticidade dinâmico são apresentados na Figura 73. Há uma queda progressiva dos valores dessa propriedade ao passo em que ocorre a adição do resíduo no concreto, para todas as idades avaliadas e nas duas relações a/c, com os maiores valores para a mistura REF 45 e os menores para a mistura TS 10/60.

Figura 73 - Resultados do ensaio de módulo de elasticidade dinâmico para as misturas com Terra de Shredder.



Fonte: A autora.

De modo a comprovar que as variáveis independentes e a interação entre elas exercem influência sobre a variável resposta (módulo de elasticidade dinâmico) em um nível de 95% de confiabilidade, os dados foram tratados no software STATISTICA 10.0 (STATSOFT, 2004) por meio da análise de variância (ANOVA) e os resultados encontrados são apresentados na Tabela 34.

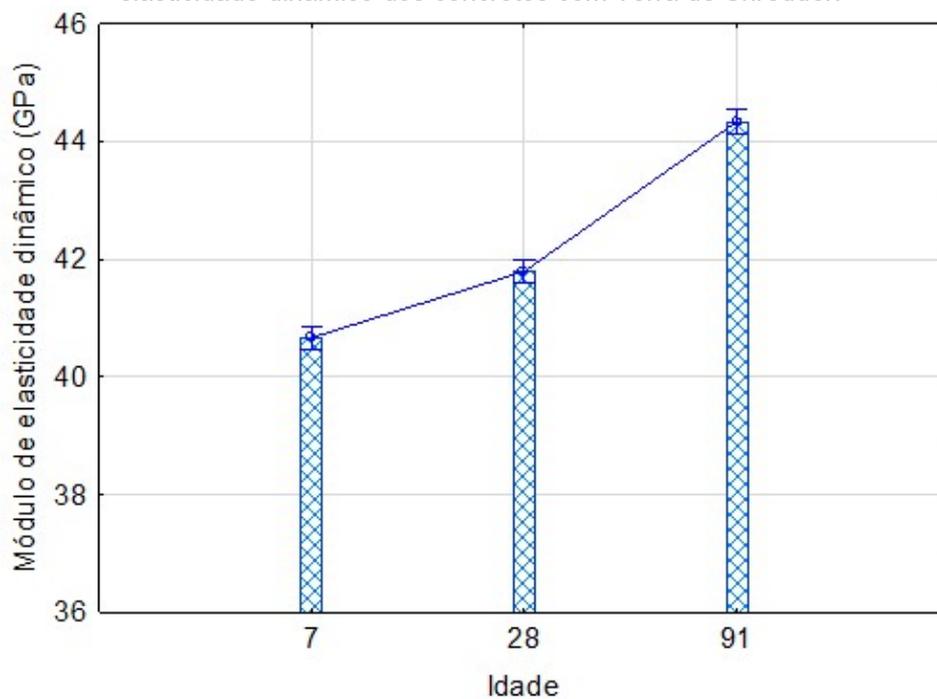
Tabela 34 - Análise de variância do módulo de elasticidade dos concretos com Terra de Shredder.

Fatores de variação	Soma dos quadrados	Grau de liberdade	MS	F	P	Significância
Idade	382	2	191,1	346	0,000	Sim
Resíduo	1060	2	530,1	961	0,000	Sim
Relação a/c	563	1	563,1	1021	0,000	Sim
Idade*Resíduo	16	4	4	7	0,000	Sim
Idade*Relação a/c	,	2	0,2	,	0,714	Não
Resíduo*Relação a/c	112	2	56	101	0,000	Sim
Idade*Resíduo*Relação a/c	5	4	1,3	2	0,053	Não
Erro	79,4	144	0,6			

Fonte: A autora.

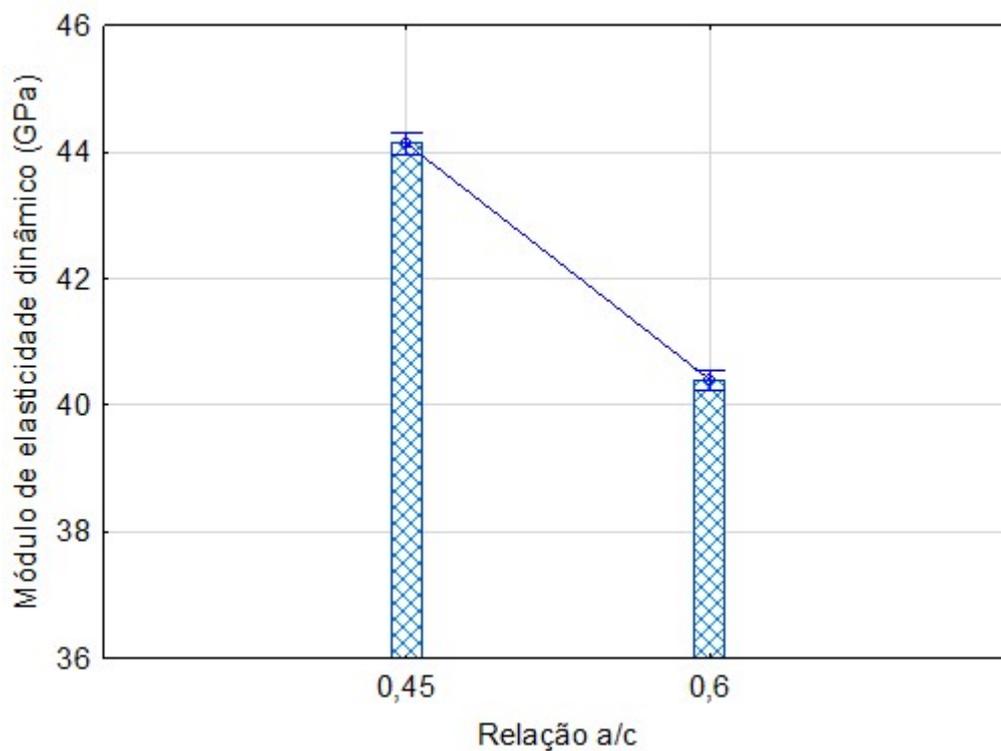
Os gráficos do efeito isolado da idade e da relação a/c são apresentados na Figura 74 e Figura 75.

Figura 74 - Gráfico do efeito isolado da variação da idade sobre a média dos resultados de módulo de elasticidade dinâmico dos concretos com Terra de Shredder.



Fonte: A autora.

Figura 75 - Gráfico do efeito isolado da variação da relação a/c sobre a média dos resultados de módulo de elasticidade dinâmico dos concretos com Terra de Shredder.



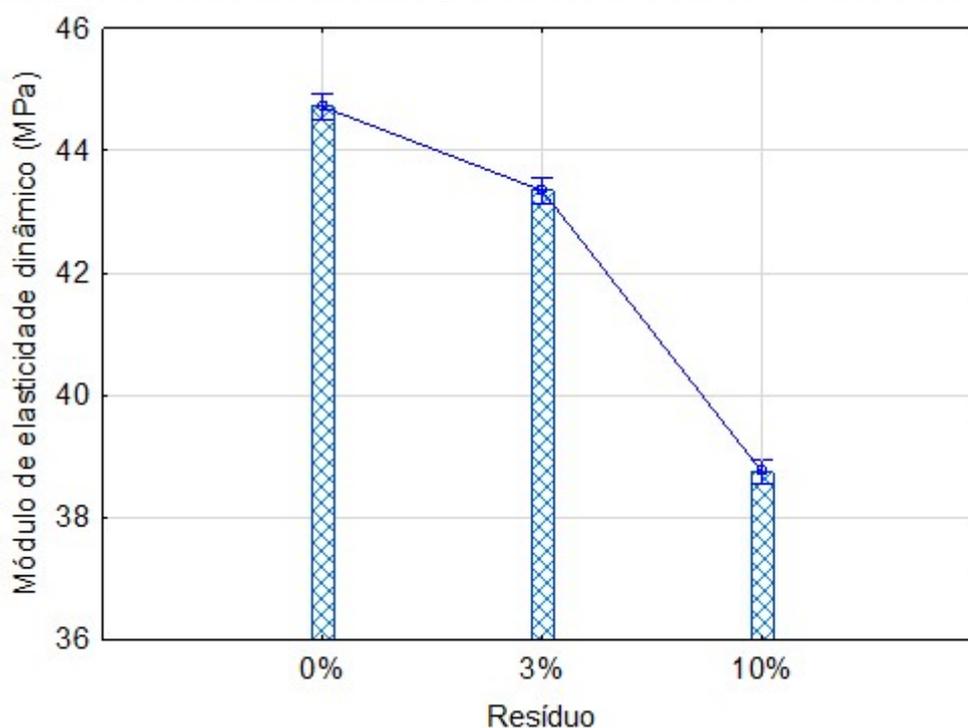
Fonte: A autora.

É possível perceber que os comportamentos esperados dos concretos não são influenciados com a adição do resíduo, o que acarreta em aumento do módulo de

elasticidade dinâmico com a idade, em função do progresso de hidratação e refinamento dos poros; e redução do módulo com o aumento da relação a/c, aumentando o conteúdo de fases não hidratadas do concreto, que não contribuem na resistência e no conseqüente aumento do módulo.

O resultado do efeito isolado do percentual de resíduo é apresentado na Figura 76. Assim como foi visto nas análises do fator isolado de percentual de resíduo para o resultado de compressão e tração, aqui também é possível perceber que o impacto maior da incorporação do resíduo acontece com 10% de adição enquanto o percentual de 3% não influencia de maneira intensificada.

Figura 76 - Gráfico do efeito isolado da variação do percentual de resíduo sobre a média dos resultados de módulo de elasticidade dinâmico dos concretos com Terra de Shredder.



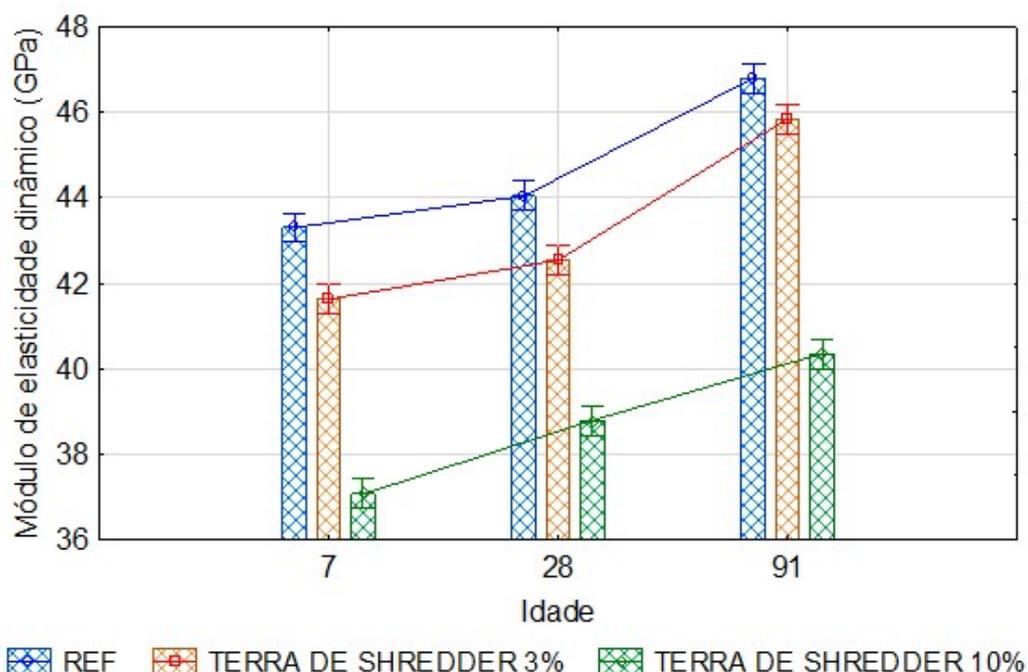
Fonte: A autora.

O gráfico da interação entre idade e percentual de resíduo é apresentado na Figura 77. O comportamento do módulo tende a seguir um comportamento semelhante ao encontrado para o resultado de resistência à compressão e foi o que ocorreu nesta pesquisa, onde as misturas com 3% de adição ficaram mais próximas às de referência enquanto as misturas com 10% de adição apresentaram uma queda mais acentuada.

Os resultados mecânicos apresentam ligações importantes na análise do comportamento dos concretos. O teor de ar aprisionado elevado nas misturas com 10% de resíduo influencia nas propriedades de resistência à compressão, à tração e

também no módulo de elasticidade, aumentando a quantidade de vazios e fissurações internas, comprometendo na capacidade de suporte de cargas, como pode ser visto na Figura 76 e Figura 77.

Figura 77 - Gráfico do efeito da interação entre o percentual de resíduo e a idade sobre a média dos resultados de módulo de elasticidade dinâmico dos concretos com Terra de Shredder.

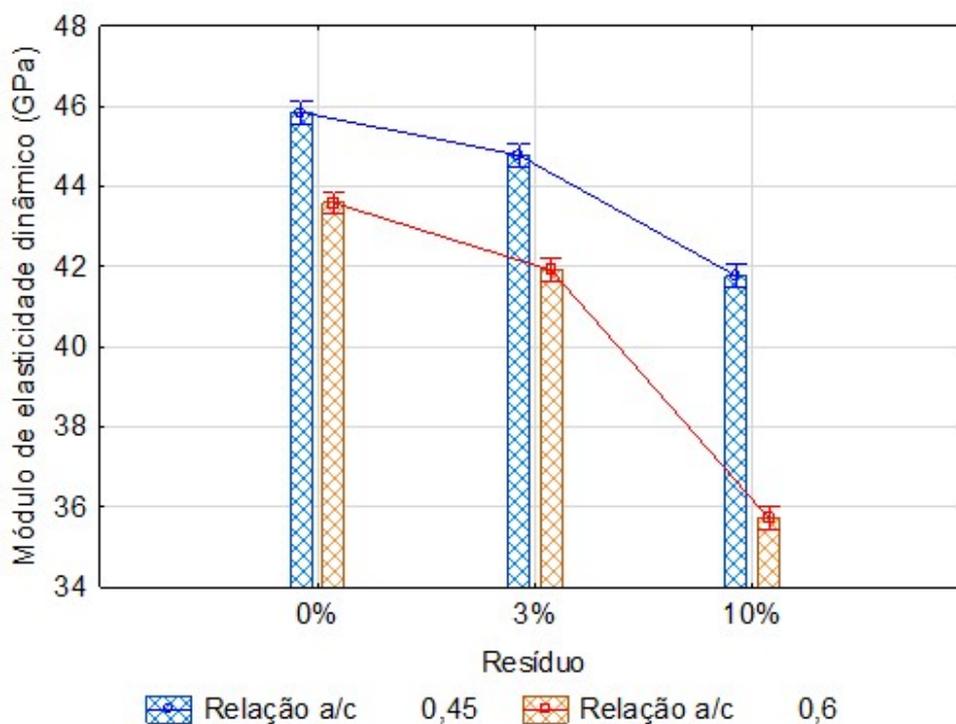


Fonte: A autora.

Por fim, o gráfico do efeito da interação entre o resíduo e a relação a/c é apresentado na Figura 78. Para as misturas com 10% de adição da Terra de Shredder, pode-se notar que a relação a/c afetou os resultados de maneira mais acentuada do que para as misturas de referência e com 3% de adição.

A queda do valor do módulo entre as relações a/c de 0,45 e 0,60 para as misturas de referência foi de 4,93% enquanto para as misturas com 3% de adição foi de 6,41% e para as misturas com 10% de adição foi de 14,49%. Assim como ocorreu no resultado de resistência à compressão, apresentado na Figura 66, aqui também é possível notar uma queda mais acentuada do módulo para a relação a/c 0,60, com o teor de 10%.

Figura 78 - Gráfico do efeito da interação entre o percentual de resíduo e a relação a/c sobre a média dos resultados de módulo de elasticidade dinâmico dos concretos com Terra de Shredder.



Fonte: A autora.

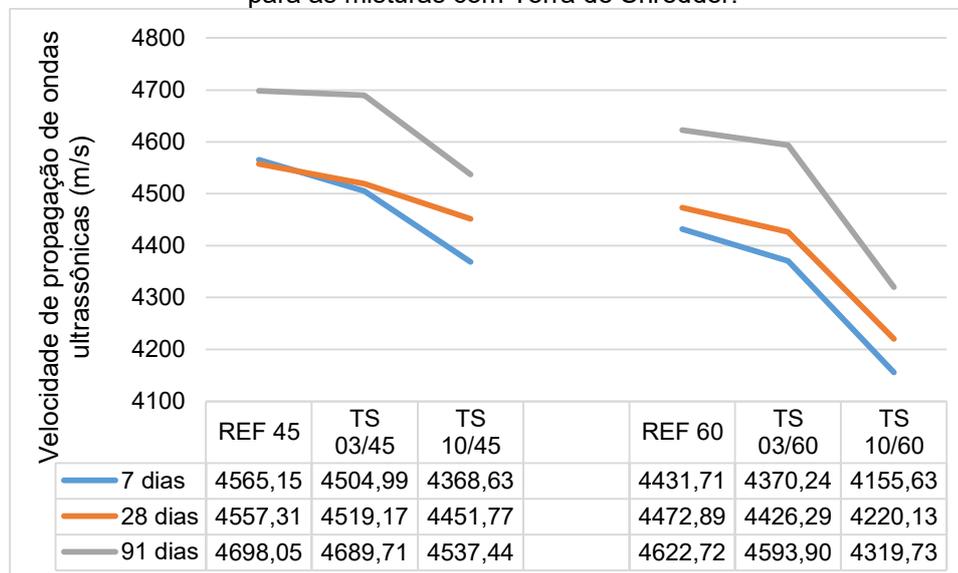
Diante dos resultados apresentados, tanto para o módulo de elasticidade quanto para a resistência à compressão e à tração, nota-se que não há contribuição do resíduo nessas propriedades, não exercendo um efeito fíler e também não contribuindo na formação de produtos hidratados. Este comportamento foi confirmado por meio da análise de atividade pozolânica feita por Caetano (2016) onde foi verificado que o resíduo não exerce atividade pozolânica com o cimento. Além disso, as argamassas confeccionadas com a Terra de Shredder, para este ensaio, apresentaram queda de aproximadamente 70% do valor da resistência à compressão das argamassas sem o resíduo.

É importante apresentar também os valores encontrados para as velocidades de propagação de ondas ultrassônicas, assim como foi feito para as misturas com o Pó de FEA, pois este resultado permite verificar a relação direta entre o resultado da velocidade da onda com o módulo de elasticidade.

A Figura 79 apresenta esses valores e nela é possível perceber comportamento idêntico ao visto para o resultado de módulo de elasticidade, no qual há queda de valor da onda ultrassônica ao passo em que ocorre a incorporação do resíduo. Tal qual foi identificado nos ensaios de resistência à compressão, à tração e no módulo

de elasticidade, nota-se que a queda nos valores foi mais acentuada para a relação a/c 0,60.

Figura 79 - Resultados do ensaio de velocidade de propagação de onda ultrassônica para as misturas com Terra de Shredder.



Fonte: A autora.

O resultado de ondas ultrassônicas é importante do que tange à verificação da qualidade do concreto em termos da análise da sua homogeneidade, da detecção de falhas internas de concretagem e até mesmo a presença e extensão de fissuras, sendo um indicador da resistência e estabilidade estrutural desse material. Na Figura 79 nota-se que, de maneira geral, há aumento do valor da velocidade de onda ultrassônica com o avanço da idade, o que indica um avanço no progresso de hidratação das misturas. A Tabela 35 apresenta uma classificação que relaciona a qualidade do concreto com a velocidade de onda-ultrassônica.

Tabela 35 - Correlação entre velocidade de onda ultra-sônica e a qualidade do concreto

Velocidade de onda ultra-sônica (m/s)	Qualidade do concreto
$V > 4500$	Excelente
$3500 < V < 4500$	Ótimo
$3000 < V < 3500$	Bom
$2000 < V < 3000$	Regular
$V > 2000$	Ruim

Fonte: Whitehurst (1966) e Rincon et al. (1998).

Por esta classificação, as misturas REF 45 e TS 03/45 foram classificadas como “excelente” em todas as idades analisadas. As misturas TS 10/45, REF 60 e TS 03/60 alcançaram a classificação de “excelente” somente aos 91 dias enquanto as outras

idades foram classificadas como “bom”. Por fim, a mistura TS 10/60 apresentou todas as idades com classificação “bom”.

5.3.6 Avaliação ambiental

A avaliação ambiental, feita por meio da análise do extrato lixiviado das amostras é apresentada na Tabela 36. É importante mencionar que a Terra de Shredder é classificada como Classe II – A (não perigoso e não inerte) pela NBR 10.004 (ABNT, 2004a) o que indica que, apesar de não ser considerado perigoso, ele possui propriedades relativas à solubilidade de metais em água sendo necessária a avaliação das propriedades de lixiviação após sua incorporação no concreto. Assim, o ensaio de tanque é uma forma de avaliar a capacidade desse material em encapsular os metais presentes no resíduo e assim verificar se o uso do resíduo é seguro do ponto de vista ambiental. Os resultados apresentados são relativos ao somatório dos ciclos de lixiviação feitos durante 64 dias e expressos em miligramas por metro quadrado do corpo de prova.

Tabela 36 - Lixiviação acumulada nos concretos produzidos com adição de Terra de Shredder (mg/m²)

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

Fonte: A autora.

Pelos valores encontrados nota-se que nenhuma mistura apresentou elementos excedentes aos parâmetros de U1 indicados na norma NEN 7375 (NNI, 2004). Isso indica que o uso da Terra de Shredder em blocos monolíticos de concreto é seguro do ponto de vista ambiental.

Nota-se que de todos os metais analisados, o Zinco e o Cromo foram os que apresentaram maiores valores de lixiviação, especialmente para as amostras com relação a/c de 0,60. Deve-se considerar que no extrato solubilizado do resíduo

nenhum deles apresentou valores excedentes e, além disso, eles também foram identificados em uma amostra de referência, o que indica que sua presença é advinda de outros materiais utilizados na confecção dos concretos.

De maneira geral, os valores de extrato lixiviado foram ligeiramente superiores para as relações a/c de 0,6. Tal comportamento é explicado pelo fato de que, em relações a/c menores a matriz se apresenta de forma mais compacta e os vazios capilares são menores e mais estreitos, contribuindo no encapsulamento dos metais (JOICHEM, 2017).

Na análise do extrato solubilizado a Terra apresentou valores de Manganês, Chumbo e Arsênio excedentes ao que a NBR 10.004 (ABNT, 2004a) estabelece, o que a classificou como não inerte. Já na análise de lixiviação de contaminantes estes mesmos elementos não ultrapassaram os limites de U1 o que indica capacidade do concreto em encapsulá-los. Apesar de a norma EA NEN 7375 (NNI, 2004) não apresentar intervalos para o Manganês, sua liberação foi baixa.

Tal situação pode ser atribuída ao pH das amostras coletadas, que se manteve entre 8,4 e 12,5 durante todo o período de ensaio. Nestas condições de pH alcalino, a fixação dos metais na matriz cimentícia é favorecida. Entretanto, deve-se considerar a heterogeneidade que o resíduo apresenta, sendo necessário sempre a análise da sua composição química e dos teores incorporados.

6 CONCLUSÃO

Os resultados aqui apresentados contribuem de maneira significativa no conhecimento e aprofundamento acerca dos resíduos em seu estado solto e quando incorporados ao concreto e funcionam como suporte para tomada de decisões de outras pesquisas, avançando na investigação dos resíduos analisados.

6.1 CONCLUSÃO DOS ENSAIOS REALIZADOS COM O PÓ DE FEA

A caracterização do Pó de FEA permite compreender os impactos que sua incorporação pode ocasionar nas matrizes de cimento: Ele é um resíduo que possui os grãos com um formato predominantemente esférico e de elevada finura, o que contribui para o aumento da trabalhabilidade do concreto mantendo a coesão do mesmo. A quantidade de zinco impacta na formação dos compostos hidratados do cimento, conferindo maiores resultados mecânicos, mas também podendo influenciar no tempo de hidratação. Sua classificação ambiental (resíduo perigoso) deve ser alvo de atenção de modo que os metais pesados não ofereçam riscos ambientais e à saúde dos usuários.

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

O ensaio de lixiviação indica que, do ponto de vista ambiental, o resíduo incorporado nas porcentagens aqui trabalhadas não apresenta restrição de uso, não oferecendo risco ao ambiente e aos usuários, entretanto, deve-se considerar a composição química do resíduo aqui estudado e os teores de adição considerados.

O Pó de FEA é um resíduo muito estudado em nível mundial e sua aplicação em matrizes de concreto apresentam resultados muito promissores pois aprimoram diversas propriedades no estado fresco e endurecido. O fato de o resíduo já ser gerado com uma granulometria fina elimina processos de beneficiamento que

dispendem de gastos energéticos, tornando seu aproveitamento ainda mais sustentável em termos ambientais.

6.1.1 Sugestão de trabalhos futuros

Como continuação dos estudos, é importante analisar de maneira mais aprofundada a influência do teor de zinco das amostras no processo de hidratação e nas propriedades mecânicas e no estado fresco, de modo a contribuir na análise do percentual mais adequado para uso. Além disso, recomenda-se também avaliar outros percentuais de incorporação além dos analisados de modo a verificar a possibilidade de incrementos maiores que 10%, com atenção à presença de ar aprisionado nas misturas. Por fim, é recomendável também a investigação do comportamento do resíduo em concretos autoadensáveis uma vez que o mesmo contribui na trabalhabilidade das misturas.

6.2 CONCLUSÃO DOS ENSAIOS REALIZADOS COM A TERRA DE SHREDDER

Em relação à Terra de Shredder, para incorporação no concreto, houve uma etapa de beneficiamento, de modo que ele atingisse uma granulometria semelhante à do cimento. Trata-se de um resíduo com uma heterogeneidade elevada pois é gerado na etapa de aproveitamento de sucatas dos mais variados tipos, o que permite a inserção de inúmeros objetos provenientes de sucatas ferrosas. Apesar de sua caracterização física se apresentar semelhante à do cimento Portland, sua caracterização química identificou uma elevada quantidade de quartzo proveniente de solo e areia, além de uma perda ao fogo alta quando comparada com resíduos utilizados na construção civil.

A heterogeneidade mencionada anteriormente reflete de maneira negativa nas propriedades mecânicas, onde foi identificada perda de resistência ao passo em que foi sendo adicionado o resíduo. De maneira geral, pelos resultados apresentados, é possível concluir que a adição da Terra de Shredder às misturas produzidas não traz benefícios mecânicos para os concretos, tendo o percentual de adição de 3% como o menos danoso.

Assim como ocorreu com os concretos com o Pó de FEA, as misturas com adição da Terra de Shredder não apresentam restrições de uso, do ponto de vista ambiental, sem oferecer riscos à saúde dos usuários e ao meio ambiente.

6.2.1 Sugestão de trabalhos futuros

A investigação do resíduo tendo em vista outras aplicações diferentes do uso em matrizes cimentícias deve ser considerada, uma vez que o resíduo não tem potencial de atividade pozolânica, já que é predominantemente cristalino e a hipótese de atuação semelhante à de fíler não foi confirmada visto o resultado de desempenho mecânico que não foi aprimorado.

REFERÊNCIAS

AENOR. Associação Espanhola de normalização e certificação. **AENOR**, Madrid. Espanha. 2017. Disponível em: www.aenor.es. Acesso em: 20 de julho de 2020.

AGOPYAN, V.; JOHN, V. M. **O desafio da Sustentabilidade na construção Civil**. 5ª Edição. São Paulo: Blucher, 2011.

ALIZADEH, M.; MOMENI, M. The effect of the scrap/DRI ratio on the specification of the EAF dust and its influence on mechanical properties of the concrete treated by its dust. **Construction and Building Materials**, v. 112, pag. 1041-1045, 2016.

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, pag. 3046-3062, 2021.

AL-TIKRITE, A.; HADI, M, N. S. Mechanical properties of reactive powder concrete containing industrial and waste steel fibres at different ratios under compression. **Constructing and Bulding Materials**, v. 154, pag. 1024-1034, 2017.

AL-ZAID, R.; AL-SUGAIR, F. H.; AL-NEGHEIMISH, A. I. Investigation of potencial uses of electric-arc furnace dust (EAFD) in concrete. **Cement and Concrete research**, v. 27, pag. 267-278. 1997.

ALMEIDA, S. M. **Análise do modulo de elasticidade estático e dinâmico do concreto de cimento Portland através de ensaios de compressão simples e de frequência ressonante**. 213p. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Construção Civil, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2012.

ALVES, E. O. **Estudo do efeito da adição de partículas de reforço de pó de aciaria elétrica em compósito de matriz metálica**. 105p. Tese (Doutorado). . Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2019.

American Society for Testing and Materials. **ASTM C597-16: Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concrete**. ASTM International: West Conshohocken/ PA, 2016. 4p.

ANTREKOWITSCH, J.; ROSLER, G.; STEINACKER, S. State of the Art in Steel Mill Dust Recycling. **Chemie Ingenieur Technik**, v. 87, pag. 1498-1503, 2015.

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

ARANHA, N.; OLIVEIRA, J. M.; BELLIO, L. O.; BONVETI, W. A lei de Hooke e as molas não-lineares, um estudo de caso. **Revista Brasileira de Ensino de Física**. v. 38. 2016.

ARAÚJO, J. A. **Reciclagem de pó de Forno Elétrico a Arco para a produção de Aglomerado Pré-fundido (APF) para uso em processo siderúrgico**. Tese

(Doutorado). 293p. Programa de Pós-Graduação em Hidráulica e Saneamento. Universidade de São Paulo. São Carlos, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10.004**: Resíduos Sólidos – Classificação. Rio de Janeiro, 71p. 2004a.

_____. **NBR 10.005**: Procedimento para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos. Rio de Janeiro, 20p. 2004b.

_____. **NBR 10.006**: Procedimento para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos. Rio de Janeiro, 7p. 2004c.

_____. **NBR 9833**: Concreto fresco – Determinação da massa específica, do rendimento e do teor de ar pelo método gravimétrico. Rio de Janeiro, 7p. 2009.

_____. **NBR 5738**: Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro, 9p, 2016.

_____. **NBR 5739**: Concreto – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 13p, 2018.

_____. **NBR 7222**: Concreto e argamassa: Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro. 9p, 2011.

_____. **NBR 8802**: Concreto endurecido: Determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica. Rio de Janeiro, 15p, 2019.

_____. **NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto – Procedimento. Rio de Janeiro, 100p, 2014a.

_____. **NBR 16697**: Cimento Portland – Requisitos. Rio de Janeiro, 16p, 2018.

_____. **NBR 16605**: Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 4p, 2017.

_____. **NBR 16372**: Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da finura pelo método de permeabilidade ao ar (método de Blaine). Rio de Janeiro, 11p, 2015.

_____. **NBR 11579**: Cimento Portland – Determinação do índice de finura por meio da peneira 75µm (nº 200). Rio de Janeiro, 4p, 2012.

_____. **NBR 16607**: Cimento Portland – Determinação dos tempos de pega. Rio de Janeiro, 4p, 2018.

_____. **NBR 7215**: Cimento Portland – Determinação da resistência a compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 12p, 2019.

_____. **NBR NM 18**: Cimento Portland – Análise química – Determinação da perda ao fogo. Rio de Janeiro, 4p, 2012.

_____. **NBR 14656**: Cimento Portland e matérias-primas – Análise química por espectroscopia de raios X – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 6p, 2001.

_____. **NBR NM 15**: Cimento Portland – Análise química – Determinação do resíduo insolúvel. Rio de Janeiro, 3p, 2012.

_____. **NBR NM 248**: Agregados – Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 6p, 2003.

_____. **NBR NM 53:** Agregado graúdo – Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro, 8p, 2009.

_____. **NBR NM 45:** Agregados – Determinação da massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro, 8p, 2006.

_____. **NBR NM 46:** Agregados – Determinação do material fino que passa através da peneira 75 μ m, por lavagem. Rio de Janeiro, 6p, 2003.

_____. **NBR NM 49:** Agregado miúdo – Determinação de impurezas orgânicas. Rio de Janeiro, 3p, 2001.

_____. **NBR 7218:** Agregados – Determinação do teor de argila em torrões e materiais friáveis. Rio de Janeiro, 3p, 2010.

_____. **NBR NM 52:** Agregado miúdo – Determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, 6p, 2009.

_____. **NBR 16889:** Concreto: Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro, 5p, 2020.

_____. **NBR 12653:** Materiais Pozolânicos – Requisitos. Rio de Janeiro, 6p, 2014b.

_____. **NBR 9781:** Peças de concreto para pavimentação – Especificação e métodos de ensaio. Rio de Janeiro, 21p. 2013.

_____. **NBR 5752:** Materiais pozolânicos – Determinação do índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias. Rio de Janeiro, 4p, 2013.

_____. **NBR 10007:** Amostragem de resíduos sólidos. Rio de Janeiro, 11p, 2004d.

_____. **NBR NM 27:** Agregados – Redução de amostra de campo para ensaios de laboratório. Rio de Janeiro, 7p, 2001.

_____. **NBR 15900-1:** Água para amassamento de concreto. Parte 1 - Requisitos. Rio de Janeiro, 11p, 2009.

_____. **NBR 12127:** Gesso para construção civil – Determinação das propriedades físicas do pó. Rio de Janeiro, 6p, 2019.

_____. **NBR 15894-3:** Metacaulim para uso com cimento Portland em concreto, argamassa e pasta. Parte 3 – Determinação da finura por meio da peneira 45 μ m. Rio de Janeiro, 3p, 2019.

_____. **NBR 15630:** Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação do módulo de elasticidade dinâmico. Rio de Janeiro, 8p 2009.

_____. **NBR 8953:** Concreto para fins estruturais - Classificação pela massa específica, por grupos de resistência e consistência. Rio de Janeiro, 3p 2015.

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.** 132p. Dissertação (Mestrado). Programa de Engenharia Hidráulica e Saneamento. Universidade de São Paulo. São Carlos. 2014.

BENETTI, J. K. **Avaliação do módulo de elasticidade dinâmico do concreto produzido com agregado graúdo reciclado**, 85p. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo, 2012.

BOTTA, A. S. **Cálculo de esforços e deslocamentos em estruturas reticuladas considerando-se a mecânica do dano para a modelagem do concreto armado**. Dissertação (Mestrado). 1998. 119p. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1998.

BRASIL, Ministério da Ciência e Tecnologia. CENTRO DE GESTÃO E ESTUDOS ESTRATÉGICOS (CGEE). **Siderurgia no Brasil – 2010-2025**, 2010.

BRASIL. Ministério Da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações. ONU MEIO AMBIENTE. **Modelagem setorial de opções de baixo carbono para o setor de ferro-gusa e aço**. 167 p. Brasília, 2017.

BRASIL. Resolução nº 307, de 05 de julho de 2002. Estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil. Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). **Diário oficial da República Federativa do Brasil**, nº 136, de 17 de julho de 2002, seção 1, Brasília-DF, pag. 95-96.

BREHM, F. A.; KULAKOWSKI, M. P.; EVALDT, D. C.; MORAES, C. A. M.; PAMPANELLI, A. B. Análise da estabilização por solidificação de lodo de fosfatização em matrizes de cimento Portland e de cerâmica vermelha para a utilização na construção civil. **Ambiente Construído**, v. 13, pag 15-27, 2013.

BRIBIÁN, I. Z.; CAPILLA, A. V.; USÓN, A. A. Life cycle assessment of building materials: Comparative analysis of energy and environmental impacts and evaluation of the eco-efficiency improvement potential. **Building and Environment**, v 46, pag. 1133-1140, 2011.

British Standards Institution. **BS 1881: Part 209 – Testing Concret – Recommendations for the measurement of dynamic modulus of elasticity**. 1990.

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**. 102p. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Hidráulica e Saneamento. Universidade de São Paulo, São Carlos, 2016.

CAETANO, J. C.; SCHALCH, V.; MAZARIEGOS, J. P. Estudo do reaproveitamento do resíduo Terra da Shredder na fabricação de peças de concreto para pavimentação em substituição ao agregado miúdo natural. In: 7º Fórum internacional de resíduos sólidos. 2016, Porto Alegre. **Anais...Porto Alegre: Instituto Venturi para Estudos Ambientais**. 2016. 10p.

CÂMARA, G. G. **Caracterização das frações do resíduo do triturador de sucata de uma siderúrgica**. Dissertação (Mestrado). 100p. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Rio Grande do Sul. Porto Alegre. 2017.

CANTARINO, M. V. **Estudo da remoção de zinco e de álcalis contidos em lamas de aciaria LD**. 97p. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-

Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2011.

CHOI, S. J.; YANG, K. H.; SIM, J.; CHOI, B. J. Direct strength of lightweight concrete with different specimen depths and aggregate sizes. **Construction and Building Materials**, v. 63, p. 132-141, 2014.

DAAKE, H. V.; STEPHAN, D. Adsorption kinetics of retarding admixtures on cement with time controlled addition. **Cement and Concrete Research**, v. 102, pag. 119-126. 2017.

DIETRICH, Y. P. **Durabilidade de concretos produzidos com a adição de resíduos provenientes de rochas ornamentais frente à ação de íons cloreto**. 179p. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Espírito Santo. Vitória, 2015.

DUARTE, H. A. Ferro – Um elemento químico estratégico que permeia a história, economia e sociedade. **Química Nova**. v. 42, n. 10, pag. 1146-1153, 2019.

EDO, M.; ARACIL, I.; FONT, R.; ANZANO, M.; FULLANA, A.; COLLINA, E. Viability study of automobile shredder residue as fuel. **Journal of Hazardous Materials**, v. 260, pag. 819-824. 2013

FARES, G.; AL-NEGHEIMISH, A. I.; AL-MUTLAQ, F. M.; ALHOZAIMY, A. M.; KHAN, M. I. Effect of fresh produced electric arc-furnace dust and chloride-free chemical accelerators on concrete performance. **Construction and Building materials**, v. 274, 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, pag. 210-221, 2016.

FIGUEIREDO, A. D. **Concreto reforçado com fibras**. Tese (Livre docência). 256p. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Universidade de São Paulo. São Paulo, 2011.

FIGUEIREDO, J. D. C. **Aplicação de uma fração do resíduo do shredder a fabricação de blocos cerâmicos estruturais**. 82p. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2016.

FONSECA, G. C. **Adições minerais e as disposições normativas relativas à produção de concreto no Brasil: uma abordagem epistêmica**. 106p. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2010.

GODINHO, J. P.; OLIVEIRA, R. L. N.; CAPRARO, A. P. B.; RÉUS, G.C.; MEDEIROS, M. H. F. Influência do formato dos corpos de prova e da idade de cura nas leituras de velocidade de ultrassom, resistividade elétrica e resistência à compressão axial. In: 3º Simpósio paranaense de patologia das construções. 2014. **Anais...Paraná**, pag. 116-129. 2018.

GRILLO, F. F.; TENÓRIO, J. A. S.; OLIVEIRA, J. R.; Caracterização e adição de poeira de aciaria elétrica em ferro-gusa. **Metalurgia e Materiais**, v. 66(3), pag. 301-307. 2013.

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

HASPARYK, N. P. Reação álcali-agregado no concreto. In: ISAIA, G. C. **Concreto: ciência e tecnologia**, São Paulo, Brasil: IBRACON, 2011. Cap. 27, pag. 933-1001.

HELENE, P.; ANDRADE, T. Concreto de cimento Portland. In: ISAIA, G. C. **Materiais de construção civil e princípios de ciência e engenharia de materiais**. 3 ed. São Paulo: Ibracon, 2017, p. 971-1005.

HELENE, P.; TERZIAN, P. **Manual de dosagem e Controle de concreto**. 1 ed. São Paulo: PINI, 1992, 349p.

HELENE, P.; TUTIKIAN, B. F. Dosagem dos Concretos de Cimento Portland. In: ISAIA, G. C. **Concreto: Ciência e Tecnologia**. São Paulo: Ibracon, p. XXXXXX. 2011.

HJELMAR, O.; WAHLSTROM, M.; ANDERSON, M. T.; LAINE-YLIJOKI, J.; WADSTEIN, E.; RIHM, T. **Treatment methods for waste to be landfilled**. Nordic Council of Ministers, Copenhagen, 2009.

IAB (Instituto Aço Brasil). **Folder Aço Brasil Sustentabilidade 2021**. Disponível em: https://acobrasil.org.br/site/wp-content/uploads/2021/09/SUSTENTAB_digital_2021.pdf. Acesso em 19 de fev. de 2022.

JACINTHO, A. P. G.A.; GIOGO, J. S. Resistência mecânica do concreto. In: ISAIA, G. C. **Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações**. São Paulo: Ibracon, 2005. Pag. 605-632.

JHA, M. K.; HUMAR, V.; SINGH, R. J. Review of hydrometallurgical recovery of zinc from industrial wastes. **Resources Conservation & Recycling**, v. 33, pag 1-22. 2001.

JOCHEM, L. F. **Efeito do agregado reciclado dos resíduos de construção e demolição na retenção dos metais pesados em processos de solidificação e estabilização**. 299p. Tese (Doutorado). Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico. Florianópolis (2017).

JUNIOR, J. C. N. T. **Obtenção, mercado e reciclagem de sucatas ferrosas na indústria siderúrgica brasileira**. 47p. Projeto de Graduação, Departamento de Engenharia Metalúrgica e Materiais da Escola Politécnica, Rio de Janeiro, 2013.

KIM, K. H.; JOUNG, H. T.; NAM, H.; SEO, Y. C.; HONG, J. H.; YOO, T. W.; LIM, B. S.; PARK, J. H. Management status of end-of-life vehicles and characteristics of automobile shredder residues in Korea, 2004, 8p. **Waste Management**, v. 24, pag. 533-540. 2004.

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

LEDESMA, E. F.; JIMÉNEZ, J. R.; AYUSO, J.; FERNÁNDEZ, J. M.; BRITO, J. Experimental study of the mechanical stabilization of electric arc furnace dust using fluid cement mortars. **Journal of Hazardous Materials**, v. 326, pag. 26-35. 2017.

LEDESMA, E. F.; LOZANO-LUNAR, A.; AYUSO, J. GALVÍN, A. P. FERNÁNDEZ, 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, pag. 365-375, 2018.

LENZ, L. A. **Avaliação da influência do empacotamento do esqueleto granular no módulo de elasticidade de concretos convencionais**. Dissertação (Mestrado). 162p. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Construção Civil. Universidade Federal do Paraná. Curitiba. 2016.

LIN, K. S.; CHOWDHURY, S.; WANG, Z. P. Catalytic gasification of automotive shredder residues with hydrogen generation, **Journal of Power Sources**, v. 195, pag. 6016 – 6023. 2010.

LIN, X.; PENG, Z.; YAN, J.; LI, Z.; HWANG, J. Y.; ZHANG, Y. LI, G.; JIANG, T. Pyrometallurgical recycling of electric arc furnace dust. **Journal of Cleaner Production**, v. 149, pag. 1079-1100. 2017.

LOAIZA, A.; CIFUENTES, S.; COLORADO, H. A. Asphalt modified with superfine electric arc furnace dust (EAF dust) with high zinc oxide content. **Construction and Building Materials**, v. 145, pag. 538-547, 2017.

LOPES, A. N. M. **Mitigação da retração autógena em concretos de alta resistência contendo aditivo redutor de retração e seus efeitos na macro e microestrutura**. 281p. Tese (Doutorado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2011.

LOZANO-LUNAR, A.; SILVA, P. R.; BRITO, J.; FERNÁNDEZ, J. M.; JIMÉNEZ, J. R. Safe use of electric arc furnace dust as secondary raw materials in self-compacting mortars production. **Journal of Cleaner Production**, v. 211, pag 1375-1388. 2019a.

LOZANO-LUNAR, A.; SILVA, P. R.; BRITO, J.; FERNÁNDEZ, J. M.; JIMÉNEZ, J. R. Performance and durability properties of self-compacting mortars with electric arc furnace dust as filler, **Journal of Cleaner Production**, v. 219, pag. 818-832, 2019b.

LU, X.; SUN, Q.; FENG, W.; TIAN, J. Evaluation of dynamic modulus of elasticity of concrete using impact-echo method. **Construction and Building Materials**, v. 47, p. 231-239, 2013.

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. B136, pag. 953-960. 2006.

MAGALHÃES, M. S. et al. 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.

MAGALHÃES, M. S.; FALESCHINI, F.; PELLEGRINO, C.; BRUNELLI, K. Effects of electric arc furnace dust (EAFD) addition on setting and strength evolutions of cement pastes and mortars. **European journal of environmental and civil engineering**, 14p, 2017.

MANTOVANI, F.; KULAKOWSKI, M. P.; MORAES, C. A. M. **Viabilidade do uso de pó de aciaria para pigmentação de concreto**. 2014. In: SEMINÁRIO DE ACIARIA – INTERNACIONAL, Porto Alegre, 14p.

MARCO, I.; CABALLERO, B.; TORRES, A.; LARESGOITI, M. F.; CHOMÓN, M. J.; CABRERO, A. A. Recycling polymeric wastes by means of pyrolysis. 2002. 8pag. **Journal of Chemical Technology and Biotechnology**, v. 77, pag 817 – 827. 2002.

MARQUES, L. M.; SALDANHA, R. B. Caracterização de resíduo da indústria siderúrgica para aproveitamento da construção civil. In: 4º Congresso Internacional de Tecnologias para o Meio Ambiente, 8p, Bento Gonçalves, 2014.

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. 2011. 5 pag. **Construction and Building Materials**, v. 25, pag. 308-312. 2011.

MASSARWEH, O.; MASLEHUDDIN, M.; DULAIJAN, S. U.; SHAMEEM, M.; AHMAD, S. Development of a concrete set retarder utilizing electric arc furnace dust. **Construction and Building Materials**, v. 255, 2020.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. **Conceto: Microestrutura, propriedades e materiais**. 3ª edição. São Paulo. Ibracon. 2014.

MENAD, N.; AYALA, J. N.; GARCIA-CARCEDO, F.; AYÚCAR, E, R.; HERNÁNDEZ, A. Study of the presence of fluorine in the recycled fractions during carbothermal treatment of EAF dust. **Waste Management**, v. 23, pag. 483-491, 2003.

MITTRI, S. H. M. **Contribuição ao estudo do comportamento de concretos produzidos com resíduo de beneficiamento de rochas ornamentais tratado termicamente em relação aos aspectos mecânicos e de durabilidade**. 168p. Dissertação. (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Espírito Santo. Vitória, 2016.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto**. 5ª edição. São Paulo. Bookman. 2016.

NIKOLIC, I.; DUROVIC, D.; MARKOVIC, S.; VESELINOVIC, L.; JANKOVIC-CASTVAN, I.; RADMILOVIC, V. V.; RADMILOVIC, V. R. Alkali activated slag cement doped with Zn-rich electric arc furnace dust. **Journal of Materials Research and Technology**, vol. 9, pag. 12783-12794, 2020.

NNI – NETHERLANDS NORMALISATIE –INSTITUUT. **EA NEN 7375: 2004: Leaching Characteristics of Moulded or Monolithic Building and Waste Materials**. Nederlands Normalisatie-instituut: Deft, The Netherlands, 2004.

NOLASCO-SOBRINHO; ESPINOSA; TENÓRIO. Characterisation of dusts and sludges generated during stainless steel production on Brazilian industries. **Ironmaking and Steelmaking**, v.30, n. 11, pag. 11-17, 2003.

OLIVEIRA, J. P.; MACIEL, E. KULAKOWSKY, M. P.; BREHM, F. A. **Estabilização por solidificação de cromo em concreto por lixiviação: comparação do método NEN 7345 com o método de imersão unisinos/inovatec adaptado**. In: IV encontro nacional sobre aproveitamento de resíduos na construção civil. ENARC. São Paulo, SP, 2015.

OLLIVIER, J. P.; VICHOT, A. **Durabilidade do Concreto** – Bases científicas para formulação de concretos duráveis de acordo com o ambiente. Ed. J. P. Ollivier e A. Vichot. Et. Tradução: O. Cascudo e H. Caraset. São Paulo: IBRACON, 2014, p. 615.

ONOUE, K.; MATSUSHITA, H. Reduction mechanisms of static compressive strength in concrete due to permeation of liquids. **Construction and Building Materials**, v. 35, pag. 808-816. 2012.

PAULA, L. N. **Transformação do pó de aciaria elétrica em materiais com aplicações para remediação ambiental**. 113p. Dissertação (Mestrado). Área de Concentração: Química Inorgânica. Universidade Federal de Alfenas, Alfenas. 2013.

PAULON, V.; KIRCHEIM, A. P. Nanoestrutura e Microestrutura do Concreto Endurecido. In: ISAIA, G. C. **Concreto: Ciência e Tecnologia**, 1 ed. São Paulo: Ibracon, 2005, Cap. 16.

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

RECKZIEGEL, V. N. **Caracterização para o aproveitamento do resíduo de um triturador de sucata em uma usina siderúrgica**. 90p. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2012.

REMUS, R., AGUADO-MONSONET, M. A., ROUDIER, S., L. D. 2013. **Best Available Techniques (BAT) Reference Document for Iron and Steel Production, Industrial Emissions Directive 2010/75/EU**. Integrated Pollution Prevention and Control. Publications Office of the European Union, Luxembourg.

RINCÓN, O. T. CARRUYO, A. R.; ANDRADE, C.; HELENE, P. L. R.; DÍAZ, I. **Manual de Inspección, Evaluación, y Diagnóstico de Corrosión em Estructuras de Hormigón Armado**. DURAR: Red Temática XV. B Durabilidad de la Armadura – Programa Iberoamericano de Ciência y Tecnología para el desarrollo, 1998.

ROSSI, D. **Influência da proporção entre as vazões de oxigênio e gás natural do sistema de injeção na eficiência energética de um forno elétrico a arco**. 77 p. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2014.

ROSSIGNOLO, J. A. **Concreto leve de alto desempenho modificado com sb para pré-fabricados esbeltos – dosagem, produção, propriedades e microestrutura**. 220p. Tese (Doutorado). Universidade de São Paulo. São Carlos. 2003.

RUBIO-CINTAS, M. D.; BARNETT, S. J.; PERES-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, pag. 675-683, 2019.

SADASIVAN, S.; THOMAS, H. R. Colour and toxic characteristics of metakaolinite-hematite pigment for integrally coloured concrete, prepared from

iron oxide recovered from a water treatment plant of an abandoned coal mine. **Journal of Solid State Chemistry**, v. 239, pag. 246-250, 2016.

SAKO, E. Y.; PANDOLFELLI, V. C. Artigo revisão – A relação entre a corrosão e a microestrutura: a chave para o desenvolvimento de concretos refratários espinelizados de alto desempenho. **Revista Cerâmica**, v. 60, pag. 127-143. 2014.

SANTOS, A. M.; CABRAL, L. M. C.; MONTEIRO, E. B.; HELENE, P. R. L. Análise do módulo de elasticidade estático e dinâmico para diferentes dosagens de concreto. In: 55º Congresso Brasileiro de Concreto, IBRACON. **Anais...2013**.

SANTOS, G. S.; NUNES, A. P. L.; FERREIRA, W. R. Avaliação do uso de lama fina de aciaria como aditivo na fabricação de concreto. **Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração**, v. 17, pag. 1-8, 2020.

SEBAG, M. G.; KORZENOWSKI, C.; BERNARDES, A. M. VILELA, A. C. Evaluation of environmental compatibility of EAFD using different leaching standards. **Journal of Hazardous Materials**, v. 166, pag. 670-675, 2009.

SENGUL, O. Mechanical properties of slurry infiltrated fiber concrete produced with waste steel fibers. **Construction and Building Materials**, v. 186, pag. 1082-1091. 2018.

SHANNAG, M. J. Characteristics of lightweight concrete containing mineral admixtures. **Construction and Building Materials**, v. 25, pag. 658-662. 2011.

SHEPPER, M.; HEEDE, P. V. D.; DRIESSCHE, I. V.; BELIE, N. Life cycle assessment of completely recyclable concrete. **Materials**, v. 7, pag. 6010-6027, 2014.

SHEWALUL, Y, W. Experimental study of the effect of waste steel scrap as reinforcing material on the mechanical properties of concrete. **Case Studies in Construction Materials**, v. 14, pag. 1-9, 2021.

SILVA, M. C. **Reciclagem de pó de aciaria elétrica como matéria-prima na fabricação de materiais cerâmicos argilosos: controle das emissões atmosféricas de zinco**. 139p. Tese (Doutorado). Programa de Pós-graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006.

SILVA, M. G.; BATTAGIN, A. F.; GOMES, V. Cimentos Portland com Adições Minerais. In: ISAIA, G. C. **Materiais de construção civil e princípios de ciência e engenharia de materiais**. 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**. Dissertação (Mestrado). 176 pag. Universidade do Vale do Rio dos Sinos. 2018.

SOARES, R. B. **Contribuição ao estudo da durabilidade de concretos produzidos com a incorporação de resíduo do beneficiamento de rochas ornamentais**. 163p. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Espírito Santo. Vitória, 2014.

SOFILIC, T.; RASTOVCAN-MIOC, A.; CERJAN-STEFANOVIC, S, NOVOSSEL-RADOVIC, V.; JENKO, M. Characterization of steel mill electric-arc furnace dust. **Journal of Hazardous Materials**, v. B109, pag. 59-70. 2004.

SOUZA, C. A.; MACHADO, A. T.; LIMA, L. R. P. A.; CARDOSO, R. J. C. Stabilization of Electric-Arc furnace dust in Concrete. **Materials Research**, v. 13, pag. 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, pag. 91-99. 2013.

STATSOFT. Statistica. versão 7.0. Statsoft, 2004. 1 CD-ROM.

SUETENS, T.; KLAASEN, B.; ACKER, K. V.; BLANPAIN, B. Comparison of electric arc furnace dust treatment Technologies using exergy efficiency. **Journal of Cleaner Production**, v. 65, pag. 152-167. 2014.

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**. 207p. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2019.

VAHCIC, M.; MILACIC, R.; MLADENOVIC, A.; MURKO, S.; ZULIANI, T.; ZUPANCIC, M.; SCANCAR, J. Leachability of Cr(VI) and other metals from asphalt composites with addition of filter dust. **Waste Management**, v. 28, pag. 2667-2674. 2008.

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, pag. 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, pag. 1833-1841. 2006.

VERMEULEN, I.; CANEGHEM, J. V.; 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, pag. 8-27. 2011.

VIEIRA, C. M. F.; SANCHEZ, R.; MONTEIRO, S. N.; LALLA, N.; QUARANTA, N. Recycling of electric arc furnace dust into red ceramic. **Journal of Materials Research and Technology**, v. 2(2), pag 88-92. 2013.

VIEIRA, G. L. **Influência de microfissuração causada por carregamento precoce nas propriedades mecânicas de concretos produzidos com diferentes tipos de cimento**. 189p. Tese (Doutorado). Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. 2008.

VIEIRA, G. L.; DAL MOLIN, D. C. C. Avaliação da resistência à compressão, resistência à tração e formação de microfissuras em concretos produzidos com diferentes tipos de cimentos, quando aplicado um pré-carregamento de compressão. **Ambiente Construído**, v. 11, n. 1, pag. 25-40. 2011.

WHITEHURST, E. A. **Evaluation of concrete properties from sonic tests**. Detroit: American Concrete Institute, 1966.

WSA (World Steel Association). **World Steel in Figures 2019**. Disponível em: <<https://www.worldsteel.org/en/dam/jcr:96d7a585-e6b2-4d63-b943>>

4cd9ab621a91/World%2520Steel%2520in%2520Figures%25202019.pdf>
Acesso em: 06 out. 2019.