



Universidade do Estado do Rio de Janeiro
Centro de Tecnologia e Ciências
Faculdade de Engenharia

Bruna Figueiredo Cezar

**Caracterização de estéril de mineração e sua utilização em
argamassas e em compósitos cimentícios reforçados com fibras de
PVA**

Rio de Janeiro
2024

Bruna Figueiredo Cezar

Caracterização de estéril de mineração e sua utilização em argamassas e em compósitos cimentícios reforçados com fibras de PVA

Dissertação apresentada, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre, ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de concentração: Estruturas.

Orientadores: Profa. Dra. Margareth da Silva Magalhães
Prof. Dr. André Rocha Pimenta

Rio de Janeiro

2024

CATALOGAÇÃO NA FONTE
UERJ / REDE SIRIUS / BIBLIOTECA CTC/B

C425 Cezar, Bruna Figueiredo.
Caracterização de estéril de mineração e sua utilização em argamassas e em compósitos cimentícios reforçados com fibras de PVA / Bruna Figueiredo Cezar. – 2024.
250 f.

Orientadores: Margareth da Silva Magalhães, André Rocha Pimenta.
Dissertação (Mestrado) – Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Faculdade de Engenharia.

1. Engenharia civil - Teses. 2. Minérios de ferro - Teses. 3. Argamassa - Teses. 4. Cimento - Teses. 5. Resistência de materiais - Teses. I. Magalhães, Margareth da Silva. II. Pimenta, André Rocha. III. Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Faculdade de Engenharia. IV. Título.

CDU 691.53:620.17

Bibliotecária: Júlia Vieira – CRB7/6022

Autorizo, apenas para fins acadêmicos e científicos, a reprodução total ou parcial desta tese, desde que citada a fonte.

Assinatura

Data

Bruna Figueiredo Cezar

Caracterização de estéril de mineração e sua utilização em argamassas e em compósitos cimentícios reforçados com fibras de PVA

Dissertação apresentada, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre, ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de concentração: Estruturas.

Aprovado em: 29 de julho de 2024.

Banca Examinadora:

Documento assinado digitalmente:
 **MARGARETH DA SILVA MAGALHÃES**
Data: 29/07/2024 09:23:55-0300
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Profa. Dra. Margareth da Silva Magalhães (Orientadora)
Faculdade de Engenharia – UERJ

Documento assinado digitalmente:
 **ANDRÉ ROCHA PIMENTA**
Data: 30/07/2024 11:09:45-0300
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Prof. Dr. André Rocha Pimenta (Orientador)
Instituto Federal do Rio de Janeiro – IFRJ

Documento assinado digitalmente:
 **KÍSSILA BOTELHO GOLIATH**
Data: 30/07/2024 11:52:30-0300
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Profa. Dra. Kíssila Botelho Goliath
Faculdade de Engenharia – UERJ

Documento assinado digitalmente:
 **CAMILA APARECIDA ABELHA ROCHA**
Data: 29/07/2024 17:16:54-0300
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Profa. Dra. Camila Aparecida Abelha Rocha
Universidade Federal Fluminense – UFF

Rio de Janeiro

2024

AGRADECIMENTOS

A meus pais, Vera Lúcia e José Eduardo, que estão sempre presentes, contribuindo não só para minha formação profissional, mas também para minha formação pessoal. Seus apoios foram fundamentais para chegar aonde estou hoje.

À minha querida professora e orientadora, Margareth Magalhães pelos mais de 6 anos de pesquisa desde a graduação com a iniciação científica até o mestrado. Foi uma experiência muito enriquecedora estes anos e que rendeu excelentes frutos. Sempre muito atenciosa, solícita e prestativa. Agradeço pelos seus ensinamentos, apoio e orientação e pela oportunidade de poder contribuir para a produção acadêmica, com artigos públicos em congressos e revista.

Ao professor André Pimenta, pela coorientação na pesquisa e auxílio na realização dos ensaios.

À empresa Geocoba e ao Eng. Gabriel Ribeiro, pelo contato com as pilhas de disposição de estéril.

À empresa Vale e sua equipe (Gustavo, Rayssa e Wesley) pela doação do estéril utilizado nesta pesquisa.

Aos técnicos do laboratório de engenharia civil da UERJ, Flávio, Danilo e André e à Vivianne, por me ajudarem no desenvolvimento do programa experimental no laboratório.

Aos laboratórios parceiros que me ajudaram na realização dos ensaios.

À UERJ e ao PGECIV, pela minha formação profissional e acadêmica.

A todos os professores que fizeram parte da minha formação acadêmica me ajudando a trilhar meu caminho profissional, especialmente a professora Bernadeth Danziger.

À CAPES e ao CNPq pelo apoio a pesquisa.

RESUMO

CEZAR, Bruna Figueiredo. *Caracterização de estéril de mineração e sua utilização em argamassas e em compósitos cimentícios reforçados com fibras de PVA*. 2024. 250 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2024.

O estéril oriundo da extração do minério de ferro é um resíduo gerado na mineração que é disposto em estruturas geotécnicas tais como pilhas, barragens ou cavas, as quais demandam monitoramento adequado para garantir a segurança destas estruturas. O setor da mineração produz elevadas quantidades deste material, garantido sua disponibilidade para aplicação em materiais cimentícios, todavia, na literatura, há poucos estudos sobre esta aplicação. A utilização do estéril como adição mineral em argamassas e compósitos cimentícios com elevada capacidade de deformação é um tema inovador, que ainda não foi relatado na bibliografia. O uso de estéril representa uma forma de tornar este tipo de compósito mais sustentável, mitigando o consumo de cimento e possibilitando a utilização de um resíduo da mineração. O presente estudo teve como objetivo o desenvolvimento de um programa experimental para a caracterização físico-química, morfológica, mineralógica e térmica do estéril e a sua aplicação em argamassas e no ECC. De acordo com os resultados deste trabalho, o estéril é um material sílico-aluminoso cristalino com grãos com formato lamelar e elevada área superficial. Os resultados de caracterização foram promissores para sua aplicação como fíler em argamassas e no ECC. Para a aplicação do estéril em argamassa, foram utilizados três teores de substituição de cimento por estéril (10%, 20% e 30%) e foram realizados ensaios no estado fresco e endurecido. No estado fresco, o estéril não afetou as misturas de argamassa, não havendo a necessidade do uso de superplastificante. Já no estado endurecido, o estéril influenciou as propriedades físicas de massa específica, absorção de água e índice de vazios e às propriedades mecânicas de resistência à compressão, tenacidade e energia de fratura. Quanto ao ECC, foram avaliados dois teores de estéril (20% e 30%) e dois teores de água/(cimento + estéril) de 0,40 e 0,32. O ECC apresentou comportamento de endurecimento quando submetido à esforços de tração e de flexão com a formação de múltiplas fissuras. A massa específica do ECC foi pouco afetada pelo uso do estéril, e a trabalhabilidade das misturas foi adequada. No estado endurecido, as propriedades físicas de massa específica, absorção de água e índice de vazios foram afetadas com o uso estéril, assim como as propriedades mecânicas de resistência à compressão, módulo de elasticidade, resistência à tração, resistência à flexão e capacidade de deformação. A redução de água na mistura, reduziu o índice de vazios, a absorção de água e a capacidade de deformação do ECC, assim como aumentou a resistência à compressão, o módulo de elasticidade, a resistência à tração e a resistência à flexão. Portanto, os resultados dos ensaios confirmaram a aplicação do estéril como adição mineral em materiais cimentícios, sendo promissores para os teores de estéril avaliados nesta pesquisa (até 30% de estéril).

Palavras-chave: Estéril de mineração; Adição mineral; Argamassa; Materiais cimentícios; Compósito cimentício reforçado com fibras; Compósito com elevada capacidade de deformação; Compósito cimentício otimizado; ECC.

ABSTRACT

CEZAR, Bruna Figueiredo. *Characterization of mining waste rock and its use in mortars and PVA fiber-reinforced cementitious composites with PVA fibers*. 2024. 250 f. Dissertation (Master's in Civil Engineering) – Faculty of Engineering, State University of Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2024.

Waste rock from the extraction of iron ore is waste generated during mining that is disposed of in geotechnical structures such as piles, dams or pits, which require adequate monitoring to ensure the safety of these structures. The mining sector produces large quantities of this material, ensuring its availability for application in cementitious materials, however, in the literature, there are few studies on this application. The use of waste rock as a mineral addition in mortars and cementitious composites with high strain capacity is an innovative topic, which has not yet been reported in the literature. The use of waste rock represents a way of making this type of composite more sustainable, mitigating the consumption of cement and enabling the use of mining waste. The present study aimed to develop an experimental program for the physical-chemical, morphological, mineralogical and thermal characterization of waste rock and its application in mortars and ECC. According to the results of this work, waste rock is a crystalline silico-aluminous material with lamellar-shaped grains and high surface area. The characterization results were promising for its application as a filler in mortars and ECC. To produce waste rock mortars, three levels of cement replacement by waste rock were used (10%, 20% and 30%) and tests were carried out in the fresh and hardened state. In the fresh state, the waste rock did not affect the mortar mixtures, meaning there was no need to use superplasticizer. In the hardened state, the waste rock influenced the physical properties of specific mass, water absorption and void index, and the mechanical properties of compressive strength, toughness and fracture energy. Regarding to ECC mixtures, two waste rock contents (20% and 30%) and two water/(cement + waste rock) contents of 0.40 and 0.32 were evaluated. The ECCs mixtures showed strain and deflection hardening behavior, with multiple cracks formation. The specific mass of fresh ECC mixtures were little affected by the use of waste rock and the workability of the mixtures was adequate. In the hardened state, the physical properties of specific mass, water absorption and void index were affected by using waste rock, as well as the mechanical properties of compressive strength, modulus of elasticity, tensile strength, flexural strength and strain capacity. The reduction of water in the ECC mixture reduced the void index, water absorption and strain capacity of the ECC, as well as increased the compressive strength, elastic modulus, tensile strength and flexural strength. Therefore, the test results confirmed its application as a mineral addition in cementitious materials, being promising for the waste rock contents evaluated in this research (up to 30% waste).

Keywords: Mining waste rock; Mineral addition; Mortar; Cementitious materials; Fiber-reinforced cementitious composite; High deformation capacity composite; Optimized cementitious composite; ECC.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Representação esquemática da geração de resíduos em minas (Fonte: Adaptado BRGM, 2001).	29
Figura 2 – Pilha de disposição de estéril (PDE) (Fonte: DMT Group, 2020).	32
Figura 3 – Distrito de Bento Rodrigues, Mariana, antes e depois do rompimento da Barragem do Fundão (Fonte: G1; 2015).	34
Figura 4 – Amostras utilizadas nos ensaios de caracterização <i>in natura</i> (Fonte: Lopes <i>et al.</i> , 2020).	38
Figura 5 – (a) Amostra de estéril no (b) local de coleta (Fonte: Garajau, 2019).	39
Figura 6 – Amostras de estéril (a) metabásica intemperizada crua e (b) filito cru (Fonte: Seerig, 2019).	40
Figura 7 – Comparação típica tensão x deformação entre FRCC (a) e SHCC (b), sob tração direta (Fonte: Adaptado de Naaman e Reinhardt, 2006).	44
Figura 8 – Resposta esquemática à flexão de todos os FRCC (Fonte: Adaptado Naaman, 2018).	45
Figura 9 – Classificação dos compósitos em relação à resposta tensão x deformação na tração e suas implicações na flexão (Fonte: Adaptado de Naaman, 2008).	45
Figura 10 – Curva tensão-deformação de tração e controle da abertura de fissura do ECC (Fonte: Weimann e Li, 2003).	46
Figura 11 – (a) Formações cristalinas autógenas em fissura do ECC e (b) fissuras no ECC (Fonte: Lepech e Li, 2009b).	47
Figura 12 – Comparação da curva tensão versus deformação do ECC convencional, do ECC de alta resistência e do UHPC (Fonte: Li, 2019).	48
Figura 13 – Ilustração do modo de fissura de Griffith (a) (modificado) e (b) do modo de fissura em estado estacionário (Fonte: Li <i>et al.</i> , 2023).	50
Figura 14 – Curva típica tensão versus abertura de fissura (Fonte Li, 2019).	51
Figura 15 – Relação entre a ductilidade e a resistência à compressão do ECC (Fonte: Adaptado Li, 2019).	53
Figura 16 – Influência do tempo na (a) curva tensão-deformação do ECC e (b) capacidade de deformação à tração (Fonte: Adaptado de Wang e Li, 2005).	55
Figura 17 – Comportamento do ECC submetido a esforço de compressão (Fonte: Adaptado Zhou <i>et al.</i> , 2015).	57

Figura 18 – Porcentagens de estudos usando fibras em ECC (Fonte: Adaptado Shanmugasundaram <i>et al.</i> , 2021a).	58
Figura 19 – Porcentagens de estudos usando diferentes adições minerais no ECC (Fonte: Adaptado Shanmugasundaram <i>et al.</i> , 2021a).	58
Figura 20 – Porcentagens de estudos usando agregado miúdo em ECC (Fonte: Adaptado SHANMUGASUNDARAM <i>et al.</i> , 2021a).	59
Figura 21 – Vigas de acoplamento localizadas no topo das aberturas ao poço do elevador (Fonte: Li, 2019).	65
Figura 22 – Configurações de amortecedores em ECC para <i>retrofit</i> de edifícios (Fonte: Fukuyama e Suwada, 2003).	65
Figura 23 – Uso de camada de ECC para retardar a formação de lascas e seu deslocamento (Fonte: Adaptado Cheung <i>et al.</i> , 2004).	66
Figura 24 – Desenho esquemático da localização da laje de ligação de ECC no tabuleiro da ponte de concreto e da viga de aço. A maior parte da laje de ECC é deslocada da viga de forma a permitir o deslocamento e a ligação com o tabuleiro é feita por pinos de cisalhamento de aço (Fonte: Li, 2019).	67
Figura 25 – Estado da laje de ligação ECC (a) imediatamente após a construção e abertura ao tráfego em 2005 e (b) em 2015. Além da leve abrasão na superfície da laje de ligação, a condição permaneceu praticamente o mesmo após 10 anos de uso (Fonte: Li, 2019).	67
Figura 26 – Construção da Ponte Mihara mostrando (a) a tabuleiro inferior de aço, (b) acoplador de cisalhamento instalado acima de uma membrana polimérica de vedação, e (c) após a aplicação do ECC (Fonte: Li, 2019).	68
Figura 27 – (a) Túnel Ten-nou JR e (b) detalhes do revestimento de ECC (Fonte: Adaptado Rokugo e Kanda, 2013).	69
Figura 28 – (a) Barragem de Mitaka, (b) abrasão no talude de montante (c) aplicação de ECC por pulverização e (d) barragem após reparo. (Fonte Li, 2019).	69
Figura 29 – Representação esquemática do reforço realizado na barragem (Fonte: Adaptado Li, 2019).	70
Figura 30 – Consumo de energia por 1000 kg de concreto armado e de ECC (Fonte: Adaptado Lepech, 2006).	72
Figura 31 – Emissão de carbono incorporada para concreto convencional e diversos tipos de ECCs (Fonte: Adaptado Shoji <i>et al.</i> , 2022).	73

Figura 32 – Pegada de carbono de incorporada de materiais cimentícios verdes (a) por unidade de massa e (b) por unidade de volume (Fonte: Shoji <i>et al.</i> , 2022).	74
Figura 33 – Fluxograma dos ensaios de caracterização para análise tecnológica do estéril e cimento (Fonte: A autora, 2024).	77
Figura 34 – Ensaios realizados nos corpos de prova de argamassa e ECC (Fonte: A autora, 2024).	78
Figura 35 – Localização do Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais (Fonte: Almada, 2021).	80
Figura 36 – Complexo Minerador de Itabira com destaque para o ponto que a amostra de estéril foi coletada (Fonte: Google Earth, Foto de 13/09/2023. Acessado em 15/10/2023).	81
Figura 37 – Ponto de coleta da amostra de estéril para o presente estudo (Fonte: A autora, 2024).	81
Figura 38 – Curva granulométrica do agregado miúdo (Fonte: Silva, 2023).	83
Figura 39 – Homogeneização e quarteamento das amostras de estéril bruto (Fonte: A autora, 2024).	85
Figura 40 – Configuração do ensaio para determinação da curva granulométrica (Fonte: A autora, 2024).	86
Figura 41 – Realização das análises MEV nas superfícies de fratura dos corpos de prova de ECC após o ensaio de tração (Fonte: A autora, 2024).	89
Figura 42 – Etapas para determinação do módulo de finura do estéril, sendo (a) separação das amostras, (b) transferência das amostras para solução de hexametáfosfato de sódio, (c) colocação da mistura na peneira, (d) colocação da peneira sob fluxo de água, (e) transferência do material com auxílio de pisseta de água e (f) colocação do material em estufa (Fonte: A autora, 2024).	91
Figura 43 – Peneiramento para realização do ensaio de índice de finura do cimento (Fonte: A autora, 2024).	92
Figura 44 – Ensaio de área de superfície específica (Fonte: A autora, 2024).	93
Figura 45 – Ensaio para determinação da massa específica do cimento (Fonte: A autora, 2024).	94
Figura 46 – Ensaio para determinação da massa específica do estéril – NBR 16605 (2017) (Fonte: A autora, 2024).	94
Figura 47 – Etapas para determinação da absorção de água do estéril– NBR 16916 (2021): (a) secagem do estéril, (b) formação do cone de estéril com deslizamento de	

suas paredes, (c) colocação do picnômetro com estéril imerso em água e (d) pesagem do picnômetros com estéril (Fonte: A autora, 2024).....	95
Figura 48 – Configuração do ensaio de fluorescência de Raio-X (Fonte: LIETA, 2023).....	97
Figura 49 – Realização do ensaio de perda ao fogo, sendo (a) colocação das amostras no forno, (b) aquecimento das amostras e (c) pesagem da amostra (Fonte: A autora, 2024).....	98
Figura 50 – (a) Produção da argamassa fabricada com cal e estéril, (b) verificação do espalhamento da mistura, (c) moldagem das argamassas e (d) cura em estufa (Fonte: A autora, 2024).....	99
Figura 51 – Realização do ensaio de atividade pozolânica com a cal (Fonte: A autora, 2024).....	100
Figura 52 – Produção das argamassas A e B (Fonte: A autora, 2023).....	101
Figura 53 – Realização do ensaio do índice de desempenho do estéril com cimento Portland (Fonte: A autora, 2024).....	101
Figura 54 – Detalhes da execução do ensaio com a mistura de argamassa: (a) adensamento das camadas, (b) rasamento da mistura, (c) consistência da mistura após retirada do tronco cônico, e (d) espalhamento da mistura de argamassa com estéril (Fonte: A autora, 2024).....	103
Figura 55 – Ensaio para a verificação da trabalhabilidade das misturas de ECC com estéril, sendo (a) C20, (b) C30 e (c) C30-1 (Fonte: A autora, 2024).....	103
Figura 56 – Ensaio de massa específica da mistura de ECC com estéril (Fonte: A autora, 2024).....	104
Figura 57 – Realização do ensaio de massa específica no estado endurecido aos 28 dias, sendo (a) e (b) pesagem do corpo de prova e (c) colocação dos corpos de prova na estufa (Fonte: A autora, 2024).....	106
Figura 58 – Realização dos ensaios de resistência à compressão com o equipamento Forney (Fonte: A autora, 2024).....	108
Figura 59 – Realização do ensaio de módulo de elasticidade (Fonte: A autora, 2024).....	109
Figura 60 – Realização do ensaio de tenacidade (Fonte: A autora, 2024).....	110
Figura 61 – Realização do ensaio de resistência à tração por compressão diametral (Fonte: A autora, 2024).....	111

Figura 62 – Dimensões do corpo de prova que será utilizado nos ensaios de resistência à tração direta (Fonte: Magalhães, 2010).	112
Figura 63 – Realização do ensaio de resistência à tração da mistura de ECC com estéril (Fonte: A autora, 2024).	113
Figura 64 – Curva típica de um compósito com múltiplas fissura (Fonte: adaptado de Magalhães, 2010).	113
Figura 65 – Realização do ensaio de resistência à flexão da mistura de ECC com estéril (Fonte: A autora, 2024).	114
Figura 66 – Curva granulométrica do estéril (Fonte: A autora, 2024).	118
Figura 67 – Imagens de microscopia eletrônica de varredura (MEV) com aproximação de (a) 60 μm e (b) 300 μm (Fonte: A autora, 2024).	120
Figura 68 – Imagem obtida por microscopia eletrônica de varredura (MEV) com quantificação de elementos por EDS – grãos maiores que 75 μm (Fonte: A autora, 2024).	121
Figura 69 – Imagem obtida por microscopia eletrônica de varredura (MEV) com quantificação de elementos por EDS – grãos entre 45 μm e 75 μm (Fonte: A autora, 2024).	122
Figura 70 – Imagem obtida por microscopia eletrônica de varredura (MEV) com quantificação de elementos por EDS – grãos menores que 45 μm (Fonte: A autora, 2024).	123
Figura 71 – Quantidade de elementos obtidas por EDS em amostras com diferentes tamanhos de grãos. (a) Grãos > 75 μm , (b) grãos entre 45 μm e 75 μm e (c) grãos < 45 μm (Fonte: A autora, 2024).	124
Figura 72 – Difratoograma de raio X da amostra de estéril (Fonte: A autora, 2024).	125
Figura 73 – Comparação da composição química do estéril do presente estudo (em vermelho) com outros tipos de adições minerais em termos dos óxidos (a) SiO_2 , CaO e Al_2O_3 e (b) SiO_2 , CaO e $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ (Fonte: A autora, 2024).	129
Figura 74 – Comparação da composição química do estéril do presente estudo (em vermelho) com o rejeito e estéril de minério de ferro em termos dos óxidos (a) SiO_2 , CaO e Al_2O_3 e (b) SiO_2 , CaO e $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ (Fonte: A autora, 2024).	130
Figura 75 – Resultado da análise térmica - Curvas TG e DTG (Fonte: A autora, 2024).	132
Figura 76 – Resultado da análise térmica – Curva DTA (Fonte: A autora, 2024).	133

Figura 77 – Formas utilizadas para a produção dos corpos de prova: (a) cilíndrica e (b) retangulares (Fonte: A autora, 2024).	136
Figura 78 – Argamassadeira utilizada para a produção das misturas de argamassa e de ECC (Fonte: A autora, 2024).	137
Figura 79 – Produção das misturas – Comparação das misturas de argamassa (a) sem e (b) com adição de 30% de estéril (Fonte: A autora, 2024).	137
Figura 80 – Moldagem e adensamento dos corpos de prova – (a) e (b) adensamento dos corpos de prova e (c) preenchimento das formas e alisamento do corpo de prova (Fonte: A autora, 2024).	138
Figura 81 – (a) e (b) Primeiras 24 horas após a produção das misturas, sendo (a) preparação para a cura dos corpos de prova em ambiente úmido, (b) identificação dos corpos de prova e (c) cura dos corpos de prova imersos em água, após 24 horas até a data dos ensaios (Fonte: A autora, 2024).	139
Figura 82 – Influência do uso do estéril na coloração dos corpos de prova de argamassa (Fonte: A autora, 2024).	139
Figura 83 – Espalhamento da mistura de argamassa no estado fresco (Fonte: A autora, 2024).	141
Figura 84 – Massa específica das misturas de argamassa (Fonte: A autora, 2024).	141
Figura 85 – Influência do teor de estéril nas massas específicas das argamassas endurecidas aos 28 dias (Fonte: A autora, 2024).	143
Figura 86 – Resultado dos ensaios de absorção de água e de índice de vazios das argamassas aos 28 dias (Fonte: A autora, 2024).	144
Figura 87 – Resistência à compressão axial das argamassas aos 7 e 28 dias em função do teor de estéril (Fonte: A autora, 2024).	145
Figura 88 – Módulo de elasticidade das argamassas aos 28 dias (Fonte: A autora, 2024).	147
Figura 89 – Resistência à tração por compressão diametral das argamassas aos 28 dias (Fonte: A autora, 2024).	148
Figura 90 – Influência do teor de estéril na tenacidade à fratura e energia de fratura das argamassas (Fonte: A autora, 2024).	149
Figura 91 – Correlação da resistência à compressão (f_c) com a tenacidade à fratura (K_m) das argamassas (Fonte: A autora, 2024).	150
Figura 92 – Realização do ensaio do funil de Marsh (Fonte: A autora, 2024).	153

Figura 93 – Formas utilizadas para a produção dos corpos de prova: (a) cilíndrica, (b) retangulares e (c) em formato de halter (Fonte: A autora, 2024).	156
Figura 94 – Produção das misturas – Comparação das misturas de ECC (a) sem e (b) com adição de 30% de estéril (Fonte: A autora, 2024).	157
Figura 95 – Aspecto da mistura C20 (a) antes e (b) depois da aplicação das fibras (Fonte: A autora, 2024).	157
Figura 96 – Moldagem dos corpos de prova – (a) adensamento do corpo de prova, (b) preenchimento das formas e (c) alisamento dos corpos de prova (Fonte: A autora, 2024).	158
Figura 97 – Primeiras 24 horas após a produção das misturas – (a) Preparação para a cura dos corpos de prova em ambiente úmido, (b) isolamento da região para manter a umidade ambiente, (c) desforma dos corpos de prova (Fonte: A autora, 2024).	158
Figura 98 – Cura dos corpos de prova imersos em água (Fonte: A autora, 2024)..	158
Figura 99 – Espalhamento das misturas de ECCs no estado fresco (Fonte: A autora, 2024).	160
Figura 100 – Massa específica das misturas de ECCs (Fonte: A autora, 2024).	160
Figura 101 – Resultado do ensaio de massa específica no estado endurecido do ECC aos 28 dias (Fonte: A autora, 2024).	162
Figura 102 – Resultado dos ensaios de absorção de água e de índice de vazios dos ECCs aos 28 dias (Fonte: A autora, 2024).	163
Figura 103 – Resistência à compressão axial dos ECCs aos 28 dias (Fonte: A autora, 2024).	165
Figura 104 – Módulo de elasticidade dos ECCs aos 28 dias (Fonte: A autora, 2024).	166
Figura 105 – Resultado do ensaio de tração do ECC – Curva tensão x deformação das misturas (a) C00, (b) C20, (c) C30 e (d) C30-1 (Fonte: A autora, 2024).	167
Figura 106 – Resultado do ensaio de tração do ECC – (a) tensão de primeira fissura e (b) deformação de primeira fissura (Fonte: A autora, 2024).	168
Figura 107 – Resultado do ensaio de tração do ECC – (a) tensão máxima e (b) deformação máxima (Fonte: A autora, 2024).	169
Figura 108 – Resultado do ensaio de tração do ECC – Módulo de Elasticidade (Fonte: A autora, 2024).	170

Figura 109 – Comparação do módulo de elasticidade da mistura de ECC submetido a esforços de compressão e de tração (Fonte: A autora, 2024).....	171
Figura 110 – Corpos de prova de ECC ensaiados à tração (Fonte: A autora, 2024).	172
Figura 111 – (a) Imagem MEV da superfície de fratura de um corpo de prova típica do compósito C00, mostrando as regiões analisadas: (b) região D1 e (c) região D2 ampliadas 200 vezes (Fonte: A autora, 2024).....	173
Figura 112 – (a) Imagem MEV da superfície de fratura do corpo de prova típico do compósito C20 mostrando as regiões analisadas: (b) região D1 ampliada 60 vezes e (c) região D2 ampliada 100 vezes (Fonte: A autora, 2024).....	174
Figura 113 – Imagens MEV da superfície de fratura de um corpo de prova típico do compósito C30: (a) e (b) ampliadas 200 vezes e (c) ampliada 30 vezes (Fonte: A autora, 2024).....	175
Figura 114 – Imagens MEV da superfície de fratura de um corpo de prova típico do compósito C30-1: (a) ampliada 200 vezes, (b) ampliada 30 vezes e (b) ampliada 200 vezes (Fonte: A autora, 2024).....	176
Figura 115 – Resultado do ensaio de flexão do ECC – Curva tensão x deflexão das misturas (a) C00, (b) C20, (c) C30 e (d) C30-1 (Fonte: A autora, 2024).	177
Figura 116– Resultado do ensaio de flexão do ECC – (a) tensão de primeira fissura e (b) deflexão de primeira fissura (Fonte: A autora, 2024).....	178
Figura 117 – Resultado do ensaio de flexão do ECC – (a) tensão máxima e (b) deflexão na ruptura (Fonte: A autora, 2024).....	179
Figura 118 – Corpos de prova de ECC ensaiados à flexão (Fonte: A autora, 2024).	180
Figura 119 – Corpos de prova após o ensaio de flexão (a) exemplo da deflexão de C20, (b) mistura C00, (c) mistura C20, (d) mistura C30 e (e) mistura C30-1 (Fonte: A autora, 2024).....	181
Figura 120 – Comparação da massa específica do ECC com a matriz de argamassa no estado fresco (Fonte: A autora, 2024).....	182
Figura 121 – Comparação da massa específica real do ECC com a matriz de argamassa aos 28 dias (Fonte: A autora, 2024).	183
Figura 122 – Comparação do índice de vazios e da absorção de água do ECC com a matriz de argamassa aos 28 dias (Fonte: A autora, 2024).....	184

Figura 123 – Comparação da resistência à compressão do ECC com a matriz de argamassa aos 28 dias (Fonte: A autora, 2024).	185
Figura 124 – Comparação do módulo de elasticidade do ECC com a matriz de argamassa aos 28 dias (Fonte: A autora, 2024).	186
Figura 125 – Registro fotográfico – Ensaio de tração direta do corpo de prova C00-01 (Fonte: A autora, 2024).	232
Figura 126 – Registro fotográfico – Ensaio de tração direta do corpo de prova C00-02 (Fonte: A autora, 2024).	232
Figura 127 – Registro fotográfico – Ensaio de tração direta do corpo de prova C00-03 (Fonte: A autora, 2024).	233
Figura 128 – Registro fotográfico – Ensaio de tração direta do corpo de prova C00-04 (Fonte: A autora, 2024).	233
Figura 129 – Registro fotográfico – Ensaio de tração direta do corpo de prova C20-01 (Fonte: A autora, 2024).	234
Figura 130 – Registro fotográfico – Ensaio de tração direta do corpo de prova C20-02 (Fonte: A autora, 2024).	234
Figura 131 – Registro fotográfico – Ensaio de tração direta do corpo de prova C20-03 (Fonte: A autora, 2024).	235
Figura 132 – Registro fotográfico – Ensaio de tração direta do corpo de prova C20-04 (Fonte: A autora, 2024).	235
Figura 133 – Registro fotográfico – Ensaio de tração direta do corpo de prova C20-05 (Fonte: A autora, 2024).	236
Figura 134 – Registro fotográfico – Ensaio de tração direta do corpo de prova C30-01 (Fonte: A autora, 2024).	236
Figura 135 – Registro fotográfico – Ensaio de tração direta do corpo de prova C30-02 (Fonte: A autora, 2024).	237
Figura 136 – Registro fotográfico – Ensaio de tração direta do corpo de prova C30-03 (Fonte: A autora, 2024).	237
Figura 137 – Registro fotográfico – Ensaio de tração direta do corpo de prova C30-04 (Fonte: A autora, 2024).	238
Figura 138 – Registro fotográfico – Ensaio de tração direta do corpo de prova C30-05 (Fonte: A autora, 2024).	238
Figura 139 – Registro fotográfico – Ensaio de tração direta do corpo de prova C30-1-01 (Fonte: A autora, 2024).	239

Figura 140 – Registro fotográfico – Ensaio de tração direta do corpo de prova C30-1-03 (Fonte: A autora, 2024).	239
Figura 141 – Registro fotográfico – Ensaio de tração direta do corpo de prova C30-1-04 (Fonte: A autora, 2024).	240
Figura 142 – Registro fotográfico – Ensaio de tração direta do corpo de prova C30-1-05 (Fonte: A autora, 2024).	240
Figura 143 – Registro fotográfico – Ensaio de flexão do corpo de prova C00-01 (Fonte: A autora, 2024).	241
Figura 144 – Registro fotográfico – Ensaio de flexão do corpo de prova C00-02 (Fonte: A autora, 2024).	241
Figura 145 – Registro fotográfico – Ensaio de flexão do corpo de prova C00-03 (Fonte: A autora, 2024).	242
Figura 146 – Registro fotográfico – Ensaio de flexão do corpo de prova C00-04 (Fonte: A autora, 2024).	242
Figura 147 – Registro fotográfico – Ensaio de flexão do corpo de prova C00-05 (Fonte: A autora, 2024).	243
Figura 148 – Registro fotográfico – Ensaio de flexão do corpo de prova C20-01 (Fonte: A autora, 2024).	243
Figura 149 – Registro fotográfico – Ensaio de flexão do corpo de prova C20-02 (Fonte: A autora, 2024).	244
Figura 150 – Registro fotográfico – Ensaio de flexão do corpo de prova C20-03 (Fonte: A autora, 2024).	244
Figura 151 – Registro fotográfico – Ensaio de flexão do corpo de prova C20-04 (Fonte: A autora, 2024).	245
Figura 152 – Registro fotográfico – Ensaio de flexão do corpo de prova C20-05 (Fonte: A autora, 2024).	245
Figura 153 – Registro fotográfico – Ensaio de flexão do corpo de prova C30-01 (Fonte: A autora, 2024).	246
Figura 154 – Registro fotográfico – Ensaio de flexão do corpo de prova C30-02 (Fonte: A autora, 2024).	246
Figura 155 – Registro fotográfico – Ensaio de flexão do corpo de prova C30-03 (Fonte: A autora, 2024).	247
Figura 156 – Registro fotográfico – Ensaio de flexão do corpo de prova C30-04 (Fonte: A autora, 2024).	247

Figura 157 – Registro fotográfico – Ensaio de flexão do corpo de prova C30-05 (Fonte: A autora, 2024).	248
Figura 158 – Registro fotográfico – Ensaio de flexão do corpo de prova C30-1-01 (Fonte: A autora, 2024).	248
Figura 159 – Registro fotográfico – Ensaio de flexão do corpo de prova C30-1-02 (Fonte: A autora, 2024).	249
Figura 160 – Registro fotográfico – Ensaio de flexão do corpo de prova C30-1-03 (Fonte: A autora, 2024).	249
Figura 161 – Registro fotográfico – Ensaio de flexão do corpo de prova C30-1-04 (Fonte: A autora, 2024).	250
Figura 162 – Registro fotográfico – Ensaio de flexão do corpo de prova C30-1-05 (Fonte: A autora, 2024).	250

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Estimativas da quantidade de estéril e rejeitos gerados nas produções brasileiras das substâncias minerais discriminadas, no período de 2010 a 2019 (Fonte: ANM AIR 48051.000384/2020-43, 2020).....	30
Tabela 2 – Estimativas por região/estado da quantidade de estéril e rejeitos gerados nas produções brasileiras das substâncias minerais discriminadas na Tabela 1, no período de 2010 a 2019 (Fonte: ANM AIR 48051.000384/2020-43, 2020).....	31
Tabela 3 – Consequências da ruptura de pilhas de disposição de estéril (PDE) relacionadas à perda de vidas, máquinas e danos ambientais (Fonte: Adaptado de Gupta <i>et al.</i> , 2021).....	34
Tabela 4 – Resumo comparativo entre FRC, ECC e outros HPFRCC (Fonte: Adaptado Banaay <i>et al.</i> , 2023).....	49
Tabela 5 – Quatro classes de ECC e suas faixas de propriedades correspondentes (Fonte: Li, 2019).....	52
Tabela 6 – Observações sobre a influência de adições minerais nas propriedades das misturas do ECC. (Fonte: Adaptado de Shanmugasundaram <i>et al.</i> , 2021a).....	62
Tabela 7 – Vantagens, desvantagens e aplicações do ECC (Fonte: Adaptado de Shanmugasundaram <i>et al.</i> , 2021a).....	63
Tabela 8 – Materiais alternativos para produção do ECC mais sustentável (Fonte: Li, 2019).....	73
Tabela 9 – Propriedades da fibra de PVA (Fonte: dados do fabricante Kuraray).....	83
Tabela 10 – Características do superplastificante Glenium 51 (Fonte: dados do fabricante BASF).....	84
Tabela 11 – Propriedades físicas do estéril bruto (Fonte: A autora, 2024).....	119
Tabela 12 – Quantificação das fases mineralógicas do estéril (Fonte: A autora, 2024).....	125
Tabela 13 – Propriedades físicas do estéril beneficiado e do cimento (Fonte: A autora, 2024).....	126
Tabela 14 – Composição química do estéril (Fonte: A autora, 2024).....	127
Tabela 15 – Comparação dos resultados do estéril com os requisitos químicos para um material pozolânico (Fonte: NBR 12653, 2014).....	131

Tabela 16 – Comparação dos resultados do estéril com os requisitos físicos para um material pozolânico (Fonte: NBR 12653, 2014).....	131
Tabela 17 – Perda de massa a partir das curvas TG/DTG (Fonte: IPT, Relatório de Ensaio Nº 1 146 513-203, 2023).	132
Tabela 18 – Quantidades de materiais em kg/m ³ , nas mistura de argamassa (Fonte: A autora, 2024).....	135
Tabela 19 – Resultado do ensaio de consistência e de massa específica da mistura de argamassa no estado fresco (Fonte: A autora, 2024).	140
Tabela 20 – Resultado do ensaio de massa específica no estado endurecido da argamassa aos 28 dias (Fonte: A autora, 2024).	142
Tabela 21 – Resultado dos ensaios de absorção de água e de índice de vazios das argamassas aos 28 dias (Fonte: A autora, 2024).....	144
Tabela 22 – Resultados do ensaio de resistência à compressão axial das argamassas aos 7 e 28 dias e de módulo de elasticidade ao 28 dias (Fonte: A autora, 2024).	145
Tabela 23 – Resultados do ensaio de resistência à tração por compressão diametral aos 28 dias (Fonte: A autora, 2024).	147
Tabela 24 – Resultado do ensaio de tenacidade à fratura e energia de fratura das argamassas (Fonte: A autora, 2024).....	149
Tabela 25 – Proporções de materiais (Fonte: A autora, 2024).....	152
Tabela 26 – Resultado do ensaio do funil de Marsh (Fonte: A autora, 2024).	154
Tabela 27 – Proporções de materiais (Fonte: A autora, 2024).....	155
Tabela 28 – Quantidades de materiais, em kg/m ³ , nas misturas de compósitos (Fonte: A autora, 2024).	155
Tabela 29 – Resultado dos ensaios de consistência e de massa específica das misturas de ECCs no estado fresco (Fonte: A autora, 2024).	159
Tabela 30 – Resultado do ensaio de massa específica no estado endurecido do ECC aos 28 dias (Fonte: A autora, 2024).	161
Tabela 31 – Resultado dos ensaios de absorção de água e de índice de vazios dos ECCs aos 28 dias (Fonte: A autora, 2024).....	163
Tabela 32 – Resultados do ensaio de resistência à compressão axial e módulo de elasticidade dos ECCs aos 28 dias (Fonte: A autora, 2024).	164
Tabela 33 – Resultados do ensaio de resistência à tração direta do ECC aos 28 dias (Fonte: A autora, 2024).	168

Tabela 34 – Análise estatística ANOVA e Tukey dos resultados do ensaio de tração do ECC (Fonte: A autora, 2024).....	169
Tabela 35 – Quantidade de fissuras nos corpos de prova após o ensaio de tração direta (Fonte: A autora, 2024).	172
Tabela 36 – Resultado do ensaio de flexão do ECC (Fonte: A autora, 2024).....	177
Tabela 37 – Análise estatística ANOVA e Tukey dos resultados do ensaio de flexão do ECC (Fonte: A autora, 2024).....	178
Tabela 38 – Quantidade de fissuras nos corpos de prova após o ensaio de flexão (Fonte: A autora, 2024).	181

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	24
1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	28
1.1 Resíduos proveniente da extração do minério de ferro	28
1.1.1 Normativas e legislações brasileiras para reaproveitamento de resíduos de mineração	36
1.2 Uso do Estéril na Construção Civil	37
1.3 Compósito Cimentício Reforçado com fibras (FRCC)	43
1.3.1 Comportamento <i>strain-softening</i> e <i>strain-hardening</i>	43
1.4 Compósito Cimentício Otimizado (ECC)	46
1.4.1 Propriedades mecânicas do ECC	51
1.4.2 Materiais utilizados na fabricação do ECC	57
1.4.3 Aplicações	63
1.4.4 Sustentabilidade do ECC	70
1.5 Utilização de resíduos da extração do ferro em compósitos cimentícios ...	75
2 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL	76
3 MATERIAIS UTILIZADOS NA PESQUISA E MÉTODOS DE ENSAIOS	80
3.1 Materiais	80
3.1.1 Estéril de minério de ferro bruto	80
3.1.2 Estéril beneficiado	82
3.1.3 Cimento	82
3.1.4 Agregado miúdo	82
3.1.5 Fibras	83
3.1.6 Superplastificante	84
3.1.7 Água	84
3.2 Métodos de Ensaio	84
3.2.1 Homogeneização e quarteamento do estéril	84
3.2.2 Ensaio no estéril bruto	85
3.2.2.1 Curva granulométrica	85
3.2.2.2 Limites de Atterberg: limite de plasticidade (LP) e limite de liquidez (LL)	86
3.2.2.3 Massa específica.....	87

3.2.2.4 Teor de umidade	88
3.2.2.5 Microscopia eletrônica de varredura (MEV)	88
3.2.2.6 Difração de raio-X	89
3.2.3 Ensaio no estéril beneficiado e no cimento	90
3.2.3.1 Índice de finura	90
3.2.3.2 Superfície específica	92
3.2.3.3 Massa específica.....	93
3.2.3.4 Composição química.....	95
3.2.3.5 Perda ao fogo.....	97
3.2.3.6 Análise térmica.....	98
3.2.3.7 Índice de atividade pozolânica	99
3.2.3.7.1 Atividade pozolânica com cal	99
3.2.3.7.2 Índice de desempenho com cimento	100
3.2.4 Ensaio realizado em argamassas e no ECC	102
3.2.4.1 Propriedades no estado fresco.....	102
3.2.4.1.1 Trabalhabilidade	102
3.2.4.1.2 Massa específica.....	104
3.2.4.2 Propriedades no estado endurecido.....	105
3.2.4.2.1 Massa específica, índice de vazios e absorção de água.....	105
3.2.4.2.2 Resistência à compressão axial e módulo de elasticidade.....	107
3.2.4.2.3 Tenacidade à fratura	109
3.2.4.2.4 Resistência à tração por compressão diametral.....	110
3.2.4.2.5 Comportamento na tração direta	111
3.2.4.2.6 Comportamento na flexão	113
3.2.4.3 Análise estatística para interpretação dos resultados	114
4 PROPRIEDADES DO ESTÉRIL BRUTO, BENEFICIADO E CIMENTO	117
4.1 Introdução.....	117
4.2 Estéril de minério de ferro bruto.....	117
4.3 Estéril beneficiado e cimento.....	126
4.4 Conclusão	133
5 DESENVOLVIMENTO DE ARGAMASSAS COM O USO DE ESTÉRIL DE	
MINERAÇÃO	135
5.1 Misturas das argamassas.....	135
5.2 Produção dos corpos de prova de argamassas.....	136

5.3 Propriedades físicas e mecânicas das argamassas	140
5.3.1 Propriedades no estado fresco.....	140
5.3.2 Propriedades das argamassas no estado endurecido	142
5.3.2.1 Propriedades físicas	142
5.3.2.2 Propriedades mecânicas	144
5.4 Conclusão	150
6 DESENVOLVIMENTO DE COMPÓSITOS CIMENTÍCIOS DO TIPO ECC, COM O USO DO ESTÉRIL DE MINERAÇÃO	152
6.1 Misturas dos compósitos cimentícios.....	152
6.2 Produção dos corpos de prova de compósitos	155
6.3 Propriedades físicas e mecânicas dos compósitos.....	159
6.3.1 Propriedades no estado fresco.....	159
6.3.2 Propriedades dos compósitos no estado endurecido.....	161
6.3.2.1 Propriedades físicas	161
6.3.2.2 Propriedades mecânicas	163
6.4 Comparação das propriedades dos compósitos com as matrizes de argamassa	182
6.4.1 Propriedades no estado fresco.....	182
6.4.2 Propriedades no estado endurecido.....	183
6.4.2.1 Propriedades físicas	183
6.4.2.2 Propriedades mecânicas	184
6.5 Conclusão	186
7 CONCLUSÃO	188
7.1 Sugestão de novas pesquisas	189
REFERÊNCIAS	191
APÊNDICE – REGISTRO FOTOGRÁFICO.....	232

INTRODUÇÃO

Um novo tipo de adição mineral inovador que apresenta uma grande disponibilidade para a aplicação em materiais cimentícios é o estéril, proveniente da extração do minério de ferro. Durante as atividades de mineração, dois tipos de resíduos são produzidos, o estéril e o rejeito. O estéril é uma camada de solo e de rocha que precisa ser removida para a extração do minério de ferro, sendo caracterizado como um material *in natura*. Já o rejeito é um subproduto do processo de beneficiamento do minério de ferro. Destaca-se que a geração de estéril corresponde mais que o dobro da produção de rejeito no Brasil, e no período de 2010 a 2019 foram produzidos 8,2 bilhões de toneladas de estéril (ANM AIR 48051.000384/2020-43, 2020).

Um dos pontos mais crítico da mineração é a disposição destes resíduos, que muitas vezes é realizada em pilhas, barragens, lagoas, represas, minas desativadas e em cavas. De acordo com o FEAM (2018), 75,43 % do estéril produzido é destinado a pilhas, 20,06 % à depósitos, 3,02 % à bota fora, 1,13 % ao recobrimento da área de lavra e 0,31% em barragens. Contudo, é válido frisar que estas estruturas geotécnicas demandam de monitoramento adequado de forma contínua, de forma a garantir estabilidade e segurança, o que representa um elevado custo ao setor de mineração além do risco de rupturas destas estruturas, que pode causar um elevado impacto ambiental.

Desta forma, a utilização de resíduos de mineração na produção de materiais cimentícios representa uma destinação mais sustentável destes materiais. Bezerra (2017) aponta o setor da construção civil como uma cadeia potencialmente apta a absorver, em larga escala, os resíduos de mineração.

Na literatura, há muitos registros de utilização de rejeito de minério de ferro em materiais cimentícios na forma de adição mineral, inclusive em compósitos cimentícios, do tipo ECC (HUANG *et al.*, 2013a). Em contrapartida, observa-se uma carência de estudos do uso de estéril de minério de ferro em materiais cimentícios, não sendo encontrado pela autora nenhuma aplicação em compósitos de elevada capacidade de deformação.

O compósito cimentício otimizado (ECC) é um compósito com alta capacidade de deformação, que foi desenvolvido por Victor Li e colaboradores na década de 1990 em Michigan (EUA). Sua capacidade de deformação varia de 200 a 800 vezes a capacidade de deformação de concretos e de compósitos cimentícios reforçados com fibras convencionais (NAAMAN, 1987; ZHOU *et al.*, 2012).

A curva tensão vs. deformação do ECC é caracterizada por um comportamento de endurecimento na tração, também conhecido, em inglês como *strain-hardening*, sendo semelhante à curva de um material metálico. Nela, a resistência máxima de tração é igual ou superior a resistência de primeira fissura, e esse endurecimento ocorre devido a formação de múltiplas fissuras, com abertura estáveis entre 60 µm e 80 µm (WEIMANN e LI, 2003).

A base do projeto do ECC consiste no ajuste de sua microestrutura de forma que as fibras, matriz e interface interajam entre si (LI, 2019). Desta forma, o ECC pode ser utilizado em diversos tipos de aplicações possuindo uma ampla faixa de parâmetros mecânicos que são obtidos de acordo com a aplicação desejada. O ECC já é utilizado em diversos países em obras de construção, reparo e reabilitação de estruturas, tais como edifícios, pontes, barragens, tuneis, muros de contenção e dispositivos de drenagem superficial (KANDA *et al.*, 2011, FUKUYAMA e SUWADA, 2003, FISCHER, 2010, ZHANG, 2014, LEUNG *et al.*, 2010; CHEUNG *et al.*, 2004 LEPECH e LI, 2008a e 2009a; ROKUGO e KANDA, 2013; HIROSHI *et al.*, 2005 ROKUGO *et al.*, 2009).

Uma desvantagem deste material é o elevado consumo de cimento que é necessário para atingir o comportamento de *strain hardening*, quando submetido esforços de tração. Uma vez que o cimento é responsável por cerca de 7% das emissões de gás carbônico no mundo (IEA, 2018), seu impacto ambiental torna-se um ponto crítico no quesito de sustentabilidade do material. Desta forma, muitas pesquisas são desenvolvidas visando a redução da quantidade de cimento através do uso de adições minerais.

A adição mineral mais utilizada no ECC é a cinza volante (SHANMUGASUNDARAM *et al.*, 2021a), contudo, a disponibilidade deste material começa a ser escassa em alguns países, dada a demanda por uso de energias mais limpas que a termoelétrica (SHOJI *et al.*, 2022). Sendo assim, a busca por novas adições minerais para o ECC é crescente e, muitas vezes, tem como base a utilização

de resíduos de processos industriais. Desta forma, o estéril representa um resíduo inovador e com ampla disponibilizada para a aplicação no ECC.

Portanto, o presente trabalho consiste na caracterização do estéril proveniente do minério de ferro brasileiro, e sua aplicação como adição mineral em argamassas e em compósito de elevada capacidade de deformação (ECC), de forma a produzir um compósito mais sustentável, com menor utilização de cimento e, conseqüentemente, mitigação das emissões de gás carbônico, bem como proporcionar uma destinação mais adequada deste resíduo de mineração, diminuindo o impacto ambiental deste setor e os custos de manutenção das estruturas geotécnicas. Dada a escassez de pesquisas sobre a aplicação do estéril em materiais cimentícios, foi necessário desenvolver um extenso programa experimental para a caracterização desse resíduo.

Objetivos

O presente trabalho tem como objetivo a caracterização experimental do estéril do minério de ferro, proveniente da Mina de Conceição, do Complexo Minerador de Itabira, localizado na região do Quadrilátero Ferrífero, no estado de Minas Gerais, Brasil. Sendo assim, o segundo objetivo principal é avaliar sua influência quando aplicado como substituto parcial do cimento em argamassas e em compósitos com elevada capacidade de deformação. Os objetivos específicos são listados abaixo.

- Caracterização físico, química, morfológica, mineralógica e térmica do estéril;
- Desenvolvimento de argamassas com a utilização de estéril como adição mineral;
- Avaliação das propriedades no estado fresco e endurecido de argamassas com adição do estéril em substituição parcial do cimento;
- Desenvolvimento de um compósito com elevada capacidade de deformação, com a utilização do estéril como adição mineral;
- Avaliação das propriedades no estado fresco e endurecido do ECC fabricado com o estéril em substituição parcial do cimento.

Estrutura da dissertação

O presente estudo foi dividido em sete capítulos, mais introdução e referências bibliográficas. O presente capítulo corresponde a parte inicial do trabalho, com uma abordagem geral do uso de estéril como adição mineral em argamassas e em compósitos cimentícios com elevada capacidade de deformação, os objetivos desta pesquisa e a estruturação da dissertação.

No primeiro capítulo é apresentada uma revisão bibliográfica sobre os resíduos provenientes da extração do minério de ferro, com destaque para o estéril e seu uso na construção civil. Além disso, é descrito o compósito cimentício otimizado (ECC) e suas propriedades.

O planejamento experimental é apresentado de forma resumida no segundo capítulo. Os materiais e a metodologia utilizados no programa experimental para a realização dos ensaios nos materiais e nas argamassas e no ECC são descritos no terceiro capítulo. O quarto capítulo contempla a caracterização do estéril (bruto e beneficiado) e do cimento utilizados para a fabricação das argamassas e do ECC. Neste capítulo é desenvolvido um extenso conjunto de ensaios para a caracterização dos materiais (principalmente do estéril). No quinto capítulo é avaliado o desenvolvimento de argamassas com a substituição parcial do cimento pelo estéril, e a apresentação das suas propriedades no estado fresco e no estado endurecido. O sexto capítulo é referente a aplicação do estéril em substituição parcial do cimento, na fabricação do ECC, e a apresentação das propriedades das misturas no estado fresco e no estado endurecido.

O sétimo capítulo compreende à conclusão do presente estudo. E por fim, na última parte são listadas as referências bibliográficas utilizadas no trabalho. Além disso, foi acrescentada uma seção extra no apêndice com o registro fotográficos dos ensaios de tração e flexão do ECC, uma vez que tais resultados são relevantes para o entendimento do comportamento do ECC.

1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

1.1 Resíduos proveniente da extração do minério de ferro

Os depósitos de minério de ferro são encontrados em diversos países, sendo que a China, Austrália, Brasil, Índia, Rússia, Ucrânia, África do Sul, Estados Unidos, Canadá e Irã correspondem aos dez países detentores das maiores reservas de minério de ferro no mundo (CHEMALE e TAKEHARA, 2013). O Brasil detém quase 19% de todas as jazidas de minério de ferro do mundo (conteúdo médio de ferro superior a 55%) (USGS, 2019). Com isso, o Brasil é o segundo maior fornecedor desse mineral, possuindo uma produção anual de 430 milhões de toneladas, enquanto a Austrália ocupa a primeira posição neste ranking. Desta forma, o minério de ferro é considerado uma das principais commodity mineral do Brasil e sua produção representa cerca de 5% do PIB industrial nacional (IBRAM, 2020; ALMADA *et al.*, 2022; ANM, 2019; ALVES, 2023). Além disso, o setor da mineração é um forte gerador de empregos no Brasil, tendo gerado 190 mil empregos diretos e mais de 2 milhões indiretos no ano de 2019 (IBRAM, 2020).

Em contrapartida, a geração e disposição de resíduos são fatores críticos na mineração, setor que corresponde a um dos principais produtores mundiais de descartes (BIAN *et al.*, 2012). Os principais resíduos gerados nas etapas de lavra e beneficiamento correspondem ao estéril e ao rejeito (ANM AIR 48051.000384/2020-43, 2020). Os termos estéril e rejeito são duas expressões utilizados na geotecnia de mineração, incluindo normas técnicas e legislações brasileira. De acordo com a resolução da ANM 85 (2021), o estéril é caracterizado como um material *in natura* descartado diretamente na operação de lavra do minério, antes do seu beneficiamento. Já o rejeito é o material descartado durante e/ou após o processo de beneficiamento do minério. Desta forma, em termos de ciência dos materiais, tanto o estéril quanto o rejeito podem ser caracterizados como um resíduo de mineração.

Na Figura 1 é apresentada uma representação esquemática da geração de resíduos em minas.

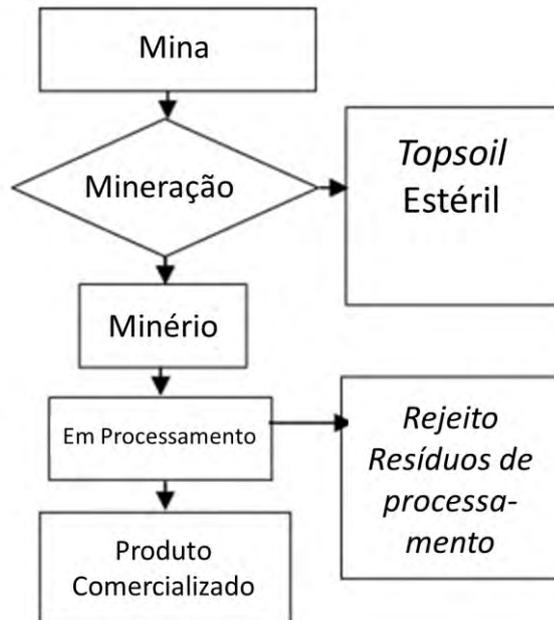


Figura 1 – Representação esquemática da geração de resíduos em minas (Fonte: Adaptado BRGM, 2001).

De acordo com Yin *et al.* (2023) o estéril representa uma camada de solo e de rocha a ser removida para acessar o minério e que não possui valor econômico. A proporção de extração (resíduo/ minério) para mineração de superfície de minérios metálicos geralmente varia de 2:1 a 5:1, dependendo das condições locais (YELLISHETTY *et al.*, 2008).

Os minérios de ferro ocorrem numa grande variedade de ambientes geológicos, por isto, existem variações nos teores e nas combinações químicas de metais contidos nas rochas, podendo determinar aplicações distintas e sua viabilidade como minério (MIRON e BOYD, 2006; YELLISHETTY *et al.*, 2008; HUANG *et al.*, 2013b). Desta forma, o estéril oriundo das explorações de minério de ferro pode ser classificado de acordo com a sua composição mineralógica, característica da jazida explorada e da separação do mineral de interesse econômico. Estas características influenciam na composição física e química do estéril. O estéril explorado no Quadrilátero Ferrífero, possui como características a presença dos seguintes óxidos: Al_2O_3 , SiO_2 , Fe_2O_3 , P_2O_5 , MnO_2 , MgO , CaO , além de matéria orgânica (JUNIA, 2017; GARAJAU, 2019).

A demanda do mercado internacional por minério de ferro gera um crescimento nas indústrias mineradoras, aumentando o volume de resíduos gerados (LAGE *et al.*, 2020). Kalisz *et al.* (2022) estimam que são gerados 65 mil milhões de toneladas de

resíduos da atividade de mineração por ano os quais representam um problema grave devido ao seu armazenamento e gestão ambiental. Nos Estados Unidos da América, a mineração produz dez vezes o volume de resíduos sólidos *per capita* produzidos internamente (JAMIESON, 2011). Na China o inventário de resíduos sólidos de minas está próximo de 70 bilhões de toneladas, dos quais o estoque de estéril é de 52 bilhões de toneladas (WANG *et al.*, 2019a).

Na Tabela 1 é apresentado um panorama da quantidade de estéril e rejeito gerados no Brasil, no período de 2010 a 2019, provenientes de diversos tipos de minérios tais como ferro, alumínio, cobre, ouro, fosfato, carvão, níquel, estanho, manganês, vanádio, zinco e cromo, e na Tabela 2 são mostradas as estimativas dessa produção em cada estado brasileiro. Observa-se que, neste período, foram produzidos 8,2 bilhões de toneladas de estéril, o que representa mais do que o dobro da quantidade de rejeito gerado. A produção de estéril proveniente do minério de ferro foi a que gerou mais resíduos em comparação com os outros minérios, representando 47,93%, e o estado de Minas Gerais é o estado com maior geração de estéril, representando cerca de 43,38% da geração brasileira.

Tabela 1 – Estimativas da quantidade de estéril e rejeitos gerados nas produções brasileiras das substâncias minerais discriminadas, no período de 2010 a 2019 (Fonte: ANM AIR 48051.000384/2020-43, 2020).

Substância	Estéril (Mt)	Estéril (%)	Rejeito (Mt)	Rejeito (%)
Ferro	3921	47,93	1372	40,87
Alumínio	1175	14,37	131	3,89
Cobre	1092	13,35	497	14,78
Ouro	520	6,36	687	20,45
Fosfato	478	5,84	290	8,64
Carvão	415	5,07	58	1,72
Níquel	292	3,57	63	1,88
Estanho	122	1,50	223	6,64
Manganês	106	1,30	16	0,49
Vanádio	26	0,31	3	0,10
Zinco	19	0,23	10	0,28

As principais reservas brasileiras de minério de ferro estão localizadas em três regiões do país: no Quadrilátero Ferrífero, em Minas Gerais, com 74,4% das reservas

nacionais, e teor de ferro médio de 41,1%; na região de Carajás, no Pará, com 19,5% das reservas nacionais e teor de ferro médio de 65,6%; e no Mato Grosso do Sul, com 2,2% das reservas nacionais e teor de ferro médio de 63,7% (DNPM, 2018).

Tabela 2 – Estimativas por região/estado da quantidade de estéril e rejeitos gerados nas produções brasileiras das substâncias minerais discriminadas na Tabela 1, no período de 2010 a 2019 (Fonte: ANM AIR 48051.000384/2020-43, 2020).

Região/UF	Estéril (Mt)	Estéril (%)	Rejeito (Mt)	Rejeito (%)
Sudeste	3624	44,30	2056	61,23
Minas Gerais	3548	43,38	2025	60,29
São Paulo	75	0,92	32	0,94
Norte	3026	36,99	708	21,09
Pará	2841	34,73	482	14,34
Amapá	113	1,38	30	0,88
Rondônia	64	0,79	113	3,35
Centro-Oeste	779	9,53	429	12,45
Goiás	661	8,08	320	9,53
Mato Grosso	112	1,37	71	2,12
Mato Grosso do Sul	6	0,07	27	0,80
Sul	415	5,08	58	1,72
Rio Grande do Sul	377	4,61	12	0,37
Santa Catarina	38	0,46	43	1,29
Paraná	1	0,01	2	0,06
Nordeste	337	4,11	112	3,51
Bahia	296	3,62	106	3,17
Maranhão	40	0,49	11	0,33
Total	8180		3358	

Um dos principais problemas do grande volume de resíduos gerados está relacionado à falta de espaço para armazenar esses resíduos, que demanda de grandes quantidades de espaço (YELLISHETTY *et al.*, 2008; ZHAO *et al.*, 2014). Zhu (2006) estima que cada 10.000 toneladas de resíduos sólidos armazenados em uma mina necessitam de um terreno com 0,067hm².

De forma geral, o estéril e o rejeito provenientes da extração do minério são dispostos em pilhas (Figura 2), barragens, lagoas, represas, minas desativadas (a céu aberto e subterrâneas) e em cavas (SIMONSEN *et al.*, 2020. EDRAKI *et al.*, 2014; ANM AIR 48051.000384/2020-43, 2020; ZHANG *et al.*, 2021, RADIC *et al.*, 2016; KURNIATI *et al.*, 2023). A disposição dos resíduos em cavas exauridas de minas a céu aberto, é considerada uma alternativa de menor risco ambiental comparada à disposição em barragens. Todavia, estas estruturas geotécnicas requerem manejo adequado e monitoramento constante para garantir a estabilidade e segurança (ANM AIR 48051.000384/2020-43, 2020).



Figura 2 – Pilha de disposição de estéril (PDE) (Fonte: DMT Group, 2020).

Outro ponto a destacar é que alguns resíduos de mineração podem estar contaminados por metais pesados ou sulfatos, possuindo assim uma elevada toxicidade e gerando preocupações em seu armazenamento (KURNIATI *et al.*, 2023; MACKLIN *et al.*, 2003). Segundo Yellishetty *et al.* (2008), a contaminação do estéril por metais pesados é relatada em diversas bibliografias, principalmente na Índia. No

Brasil, há registros da contaminação de metais pesados em estéril provenientes da extração da bauxita (VIEIRA, 2001) e de carvão (BITENCOURT *et al.*, 2015). O descarte inadequado de resíduos de mineração pode resultar em graves riscos ambientais, tais como a contaminação do solo e dos recursos hídricos (águas subterrâneas e superficiais), a geração de drenagem ácida de minas, a extinção da biodiversidade, o impacto na qualidade do ar (poeira), além de acarretar danos à saúde humana (YUAN e XU, 2004; LIU *et al.*, 2012; HAKKOU *et al.*, 2008; WOLKERSDORFER e BOWELL, 2004; NRC, 2002; AZAM e LI, 2010; KHALIL *et al.*, 2013; YELLISHETTY *et al.*, 2008; SAKO *et al.*, 2018; DOLD, 2014; DUDKA e ADRIANO, 1997; RIGET *et al.*, 1997; PERNER *et al.*, 2010; AGBOOLA *et al.*, 2020; WORLANYO e JIANGFENG, 2021). Todavia há registro de resíduos de mineração contaminados por metais pesados incorporados à concretos e argamassas, que indicaram que os materiais cimentícios são uma destinação adequada para sequestro de metais nocivos, resultando em materiais com insignificantes índices de lixiviação (ARGANE *et al.*, 2015; ALP *et al.*, 2008; KURNIATI *et al.*, 2023).

Os resíduos gerados na atividade de mineração representam tanto um custo ao empreendedor, pois seu manejo adequado implica em despesas, quanto um passivo ambiental, pois os volumes movimentados precisam ser dispostos de forma correta e monitorados para evitar acidentes ou contaminação (ANM AIR 48051.000384/2020-43, 2020; ZHANG *et al.*, 2021). Na literatura há registros de rupturas de pilhas de disposição de estéril que resultaram na perda de vidas humanas, perda de equipamentos e danos ambientais. Os principais casos são resumidos na Tabela 3.

A necessidade de uma destinação mais sustentável aos resíduos da mineração ganhou mais relevância após os desastres das barragens de rejeito em Mariana, em 2015, e Brumadinho, em 2019 (ANM AIR 48051.000384/2020-43, 2020). Os rompimentos recentes da barragem de Fundão (Mariana) e da barragem I (Brumadinho), causaram danos irreparáveis aos meios físico, biológico e socioeconômico, com a contaminação da bacia do rio doce, destruição do distrito de Bento Rodrigues (Figura 3) e diversas perdas de vidas humanas (WISE URANIUM, 2019). Diversos outros acidentes envolvendo barragens com significativos impactos ambientais e danos à sociedade são relatados na literatura, como o da Rússia (1981), Huangmeishan/China (1986), Taoshi/China (2008), Canadá (2011), Hubei/China (2017), China (2018) (WISE URANIUM, 2019; KE *et al.*, 2016; YANG *et al.*, 2017).

Tabela 3 – Consequências da ruptura de pilhas de disposição de estéril (PDE) relacionadas à perda de vidas, máquinas e danos ambientais (Fonte: Adaptado de Gupta *et al.*, 2021).

Local	Tipo de estéril	Ano	Consequência
Aberfan, Reino Unido	carvão	1966	144 mortes
Buffalo, EUA	carvão	1972	118 mortes
Sichuan, China	ferro	1970	104 mortes e perda de equipamentos
Tong guan, China	ouro	1994	Mais de 100 mortes
Shenzhen, China	gesso	2015	77 mortes
ECL, Índia	carvão	2016	23 mortes e perdas de equipamento
MCL, Índia	carvão	2013	14 mortes
MCL, Índia	carvão	2013	13 mortes
BC, Canada	carvão	1985	2,5 km do rio foram afetados por resíduos resultando em diversos danos ambientais
Kentucky, USA	carvão	2020	Danos ambientais



Figura 3 – Distrito de Bento Rodrigues, Mariana, antes e depois do rompimento da Barragem do Fundão (Fonte: G1; 2015).

Neste contexto, o reaproveitamento dos resíduos de mineração na produção de materiais para uso na construção civil corresponde a uma alternativa para reduzir a necessidade relacionada ao emprego destas estruturas geotécnicas (ZHAO *et al.*, 2014; ANM AIR 48051.000384/2020-43, 2020). A gestão adequada dos resíduos é um dos principais requisitos para o desenvolvimento sustentável na mineração (ARGANE *et al.*, 2015; LAGE *et al.*, 2020).

Na literatura há muitos relatos da aplicação do rejeito proveniente do minério de ferro para a produção de clínquer (ALP *et al.*, 2008; ZHENG *et al.*, 2013; YANG *et*

al., 2015), de tijolos e telhas cerâmicas (DAS *et al.*, 2000; YAO *et al.*, 2020; CHEN *et al.*, 2016; CHEN *et al.*, 2011; YANG *et al.*, 2014), de blocos de piso intertravado de concreto (SANT'ANA FILHO, 2013), de concreto aerado (CAI *et al.*, 2016; WANG *et al.*, 2016), de camada de pavimentação (CAMPANHA, 2011; PINTO, 2013; BASTOS, 2013; BASTOS *et al.*, 2016; OLIVEIRA *et al.*, 2019), de geopolímero (DUAN *et al.*, 2016), de pigmento para tintas sustentáveis (GALVÃO *et al.*, 2018), de corante de cerâmica (PEREIRA, 2012) e de argamassas e concretos convencionais, sendo utilizados como adições minerais (BEZERRA, 2017; BEZERRA *et al.*, 2021; SIMONSEN *et al.*, 2020; YUNHONG *et al.*, 2016; YAO *et al.*, 2020; ZHAO *et al.*, 2021; ALMADA, 2021; HAN *et al.*, 2017; PEDROSO, 2020) ou como agregados (ARGANE *et al.*, 2015; BENIWAL *et al.*, 2015; JANKOVIC *et al.*, 2015; THOMAS *et al.*, 2013; HAN *et al.*, 2017; ZHU *et al.*, 2022; PROTASIO *et al.*, 2021; FONTES *et al.*, 2016). Os rejeitos também foram utilizados como agregados para a produção de concreto de ultra alto desempenho (ZHAO *et al.*, 2014; ZHANG *et al.*, 2020b), e como agregado (HUANG *et al.*, 2013a) ou adição mineral (HUANG *et al.*, 2013b), na produção de compósitos cimentícios reforçados com fibras.

Em contrapartida, há poucos estudos com relação ao aproveitamento do estéril na construção civil. A maior parte destes se concentram na utilização deste material como agregado, para a fabricação do concreto (NGUYEN *et al.*, 2023; YELLISHETTY *et al.*, 2008; LOPES *et al.*, 2020; GAYANA e CHANDAR, 2018) e mistura asfáltica (SHAMSI e ZAKERINEJAD, 2023), e como adição mineral em pastas de cal (SEERIG *et al.*, 2019; SEERIG, 2019).

Portanto, o setor da construção civil é associado a uma opção alternativa e mais sustentável dos resíduos da atividade de mineração, possibilitando o reaproveitamento destes resíduos, uma vez que o setor consegue absorver uma grande faixa granulométrica com finalidades diversificadas, o que proporciona a redução de impactos ambientais negativos associados à disposição desses materiais, além da redução da demanda por recursos naturais (LAGE *et al.*, 2020; BORGES, 2021; BEZERRA, 2017).

1.1.1 Normativas e legislações brasileiras para reaproveitamento de resíduos de mineração

A seguir é apresentado um breve resumo das principais normativas e legislações brasileiras que tratam do tema do reaproveitamento dos resíduos da mineração.

Na legislação brasileira, o Decreto-Lei nº 227/1967 – Código de Mineração, principal instrumento legal do setor mineral, não trata de forma explícita o aproveitamento de resíduos da atividade. A disposição de estéril, rejeitos e demais produtos é abordada na Norma Reguladora de Mineração (NRM) nº 19 de 2001; porém, também sem referência ao aproveitamento econômico desses materiais (ANM AIR 48051.000384/2020-43, 2020).

A Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) foi instituída pela Lei Federal nº 12.305 em 2010, que dispõe sobre seus princípios, objetivos e instrumentos, bem como sobre as diretrizes relativas à gestão integrada e ao gerenciamento de resíduos sólidos, incluídos os perigosos, às responsabilidades dos geradores e do poder público e aos instrumentos econômicos aplicáveis. Para os efeitos desta Lei, no Artigo 13, os resíduos de mineração estão incluídos nos resíduos sólidos, sendo descritos como os gerados na atividade de pesquisa, extração ou beneficiamento de minérios. No Artigo 47, é proibido a destinação ou disposição final de resíduos sólidos ou rejeitos e no Artigo 20 é citado que estes resíduos estão sujeitos à elaboração de plano de gerenciamento de resíduos sólidos.

Em 2016 foi publicada a recomendação N°014/2016-MPF-GAB/FT do Ministério Público Federal (MPF), que considera a gestão integrada dos resíduos sólidos se traduz no conjunto de ações voltadas para a busca de soluções para os resíduos sólidos sob a premissa do desenvolvimento sustentável (art. 3º, inciso XI, da Lei n. 12.305/2010), que deve ser observada no processo minerário, com a destinação dos resíduos da mineração passando das pilhas de estéreis e barragens de rejeitos para uma reintrodução na cadeia produtiva, por meio do aproveitamento como matéria-prima para produtos da construção civil. Ainda, foi recomendado que o Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM), se abstenha de aprovar Plano de Aproveitamento de Econômico (PAE) de lavra de minério de ferro que não contemple a destinação ambientalmente adequada dos resíduos da mineração, com a sua devida introdução em outra cadeia econômica.

Recentemente, com a alteração do Regulamento do Código de Mineração, por meio do Decreto nº 9.406/2018, buscou-se estimular o aproveitamento de rejeitos, estéril e demais resíduos da mineração, inclusive mediante simplificação de procedimentos. Da mesma forma, a Lei nº 13.540/2017 estabeleceu que os rejeitos e estéril gerados em áreas objeto de direitos minerários que possibilitem lavra, na hipótese de alienação ou consumo, serão considerados como bem mineral para fins de recolhimento da Compensação Financeira pela Exploração de Recursos Minerários (Cfem). Além disso, para o aproveitamento de rejeitos e estéril de minerais associados a outras cadeias produtivas em relação à substância principal do empreendimento, haverá redução de 50% da alíquota da Cfem (ANM AIR 48051.000384/2020-43, 2020).

A Análise de Impacto Regulatório (AIR) 48051.000384/2020-43 da Agência Nacional de Mineração (ANM) elaborada em 2020 abordou como tema da AIR o aproveitamento de estéril e rejeitos, tendo como objetivo o estabelecimento de parâmetros legais de dominialidade dos rejeitos e estéril resultantes da atividade de mineração, o aperfeiçoamento dos procedimentos necessários ao acesso e exploração, o estímulo ao aproveitamento econômico e a gestão das informações sobre os rejeitos e estéril. Além disso, a Resolução da ANM Nº 85 publicada em dezembro de 2021, dispõe sobre diversos procedimentos para o aproveitamento de rejeitos e estéreis.

Por último, a Norma ABNT NBR 10004 (2004) – Resíduos Sólidos – Classificação possibilita a classificação dos resíduos sólidos quanto aos seus riscos potenciais ao meio ambiente e à saúde pública para que possam ser gerenciados adequadamente em Classe I- Perigosos, Classe II - Não perigosos, sendo esta subdivida em II A- Não Inertes e II B – Inertes.

1.2 Uso do Estéril na Construção Civil

Conforme foi apresentado no Item 1.1, há uma escassez de estudos sobre o aproveitamento do estéril em matérias cimentícios. A seguir é apresentada uma revisão dos estudos encontrados na literatura. Destaca-se que não há registros da aplicação do estéril em compósitos cimentícios reforçados com fibras.

Lopes *et al.* (2020) avaliaram o reaproveitamento do estéril como agregado graúdo para fabricação do concreto. Os autores realizaram uma caracterização física

e química do estéril proveniente do sudeste goiano oriundos de quatro frentes de lavra diferentes. Foram avaliadas as propriedades de massa específica, massa unitária compactada, absorção de água, teor de argila e de materiais friáveis, resistência mecânica, conteúdo de material fino, distribuição granulométrica e índice de forma. As amostras coletadas (Figura 4) possuíam granulometria variando de 12,50 mm a 50 mm. A massa específica variou de $2,63 \text{ g/cm}^3$ a $2,78 \text{ g/cm}^3$ e a massa unitária de $1,38 \text{ kg/m}^3$ a $1,58 \text{ kg/m}^3$. A absorção de água ficou entre 0,89% e 2,70%. O índice de forma variou de 2,00 a 2,82 e a resistência de abrasão foi de 19,54%. Em relação à durabilidade, o índice de desintegração foi de 0,22%, para a solução de sulfato de sódio, e 0,17% para a solução de sulfato de magnésio. Vale destacar que os autores realizaram 4 lavagens das amostras de brita e perceberam uma redução de turbidez a partir do 3º ciclo de lavagem. Foi verificado um elevado teor de material particulado aderido aos agregados com teores de até 1,86%. A porcentagem de torrões de argila e materiais friáveis variou entre 0,38% e 0,70%. Por fim, o estudo concluiu que as características do estéril permitem a sua utilização como agregado graúdo.

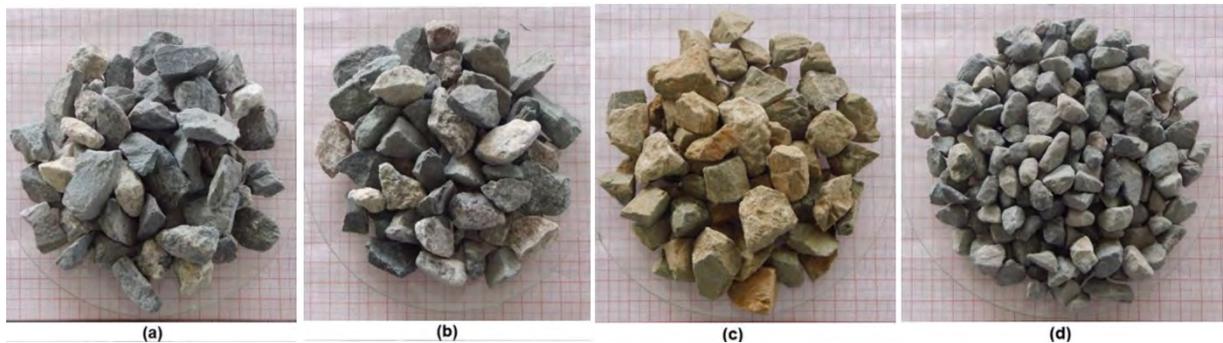


Figura 4 – Amostras utilizadas nos ensaios de caracterização *in natura* (Fonte: Lopes *et al.*, 2020).

Garajau (2019) avaliou o estéril proveniente de Nova Lima, Minas Gerais, através de ensaios de granulometria, composição química e mineralógica e morfologia. O local de coleta é mostrado na Figura 5, onde é possível observar uma ampla faixa granulométrica de estéril. Todavia, no estudo foi coletada a fração mais granular do material (Figura 5a) a qual contém 79,78% de pedregulhos (2,0 a 75,0 mm), 6,78% de areia grossa (0,425 a 2 mm), 4,23 % de areia fina (0,075 a 0,425 mm) e 8,49 % de silte e argila (<0,075 mm), também chamado de material pulverulento. A média da composição química das amostras foram 16,88% de SiO_2 (5,06% – 27,37%),

9,28 % de CaO (4,19% – 14,25%), 1,57% Al₂O₃ (0,81% – 2,53%) e 32,94% Fe₂O₃ (18,73% – 45,60%) e a média de perda ao fogo foi de 15,57% (7,69% – 22,80%). Na análise de microscopia eletrônica de varredura, foram verificados formatos de grãos arredondados, tubulares e laminares e o resultado de EDS indicou a presença de oxigênio, magnésio, sílica, cálcio, fosforo e ferro. Com base nesta análise foi identificada a presença dos seguintes minerais: talco, devido à presença dos elementos Al, Si, Fe; calcita ou dolomita, por apresentar Ca, C, O e magnesita ou dolomita, por apresentar Mg, O, Fe. Dessa forma, o autor classificou o estéril como um itabirito dolomítico. O autor concluiu após os ensaios de caracterização que o estéril seria viável para aplicação na construção civil como brita.

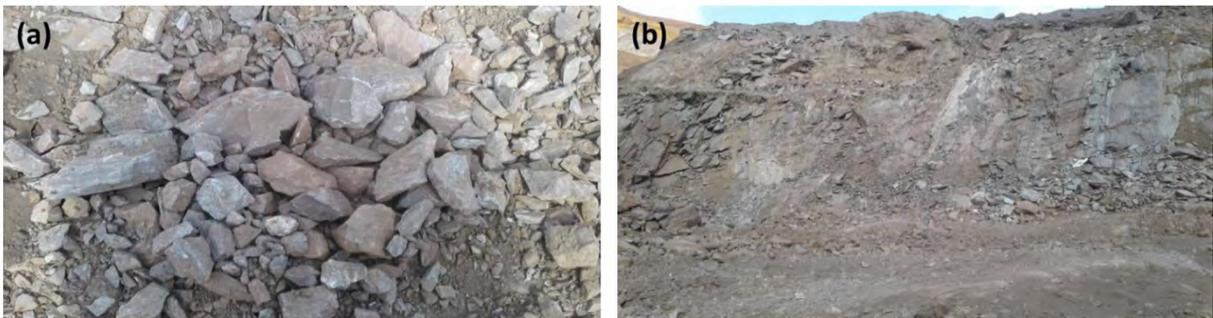


Figura 5 – (a) Amostra de estéril no (b) local de coleta (Fonte: Garajau, 2019).

Seerig *et al.* (2019) caracterizaram o estéril para uso como matéria prima para a produção de pozolanas. Foi utilizada uma amostra de estéril do Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, cuja litologia era de rocha metabásica intemperizada. O estéril cru foi calcinado em mufla (calcinação lenta) e em forno flash (calcinação rápida) para obter atividade pozolânica. A composição química do estéril cru era de 25,96% de SiO₂, 0,06% de CaO, 29,22% de Al₂O₃ e 24,88 % de Fe₂O₃. A análise mineralógica identificou a presença da caulinita e a análise morfológica, que os grãos eram lamelares. Após a calcinação, foi observada a presença de metacaulinita, com uma abundância da fase amorfa, a qual conservou a estrutura lamelar da caulinita, mantendo a superfície muito semelhante, mas com deformações em suas bordas.

Os ensaios de resistência à compressão dos corpos de prova contendo 40% de cal hidratada e 60% de estéril, após 1, 2 e 3 dias de cura, comprovaram a atividade pozolânica do estéril após calcinação, uma vez que a resistência dos corpos de prova aumentou nas idades de estudo. Destaca-se que as resistências das misturas com estéril calcinado em forno flash foram significativamente mais altas que os de estéril

calcinado em mufla. Os autores concluíram que a morfologia do estéril com calcinação flash favoreceu a reação do estéril com o hidróxido de cálcio, tornando a reação pozolanica mais efetiva.

Seerig (2019) aprimorou o estudo anterior sobre a caracterização de estéril para uso como material pozolanico após calcinação em forno flash, utilizando estéril de duas litologias diferentes do Quadrilátero Ferrífero, a metabásica intemperizada e o filito. Na Figura 6 são mostradas as amostras de estéril antes da calcinação, e é possível observar a heterogeneidade granulométrica do material. Após a calcinação destes resíduos, foram realizados ensaios de granulometria e superfície específica, onde se verificou que ocorreu um aumento dos diâmetros das partículas e redução da área superficial, que foram justificados pela aglomeração das partículas do estéril após a calcinação, ocorrendo o processo de sinterização.

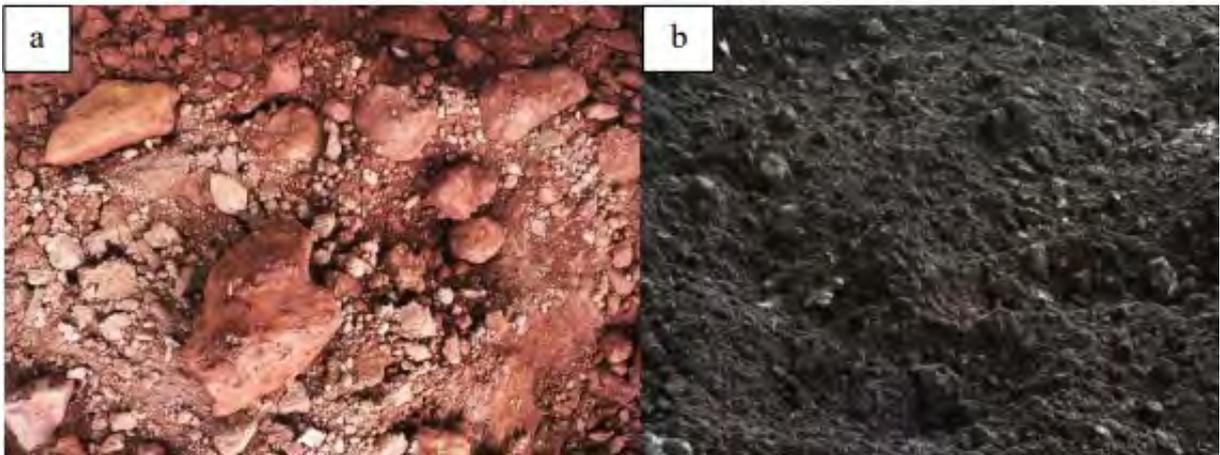


Figura 6 – Amostras de estéril (a) metabásica intemperizada crua e (b) filito cru (Fonte: Seerig, 2019).

A composição química do estéril de filito foi de 58,41% de SiO_2 , 0,03% de CaO , 6,28% de Al_2O_3 e 20,06 % de Fe_2O_3 . Comparando a composição das duas amostras, a amostra de filito apresentou maior teor de SiO_2 e menor teor de Al_2O_3 que a metabásica. A composição mineralógica da metabásica mostrou presença abundante de caulinita e gibbsita, média de hematita e baixa de goethita e moscovita, e para o filito foram identificados como abundantes, o quartzo e a goethita, médio teor de caulinita, e baixo teor de hematita. Após a calcinação, a maior parte do material mostrou-se amorfo, apenas com alguma caulinita residual, quartzo e hematita, como fases cristalinas significativas. A análise morfológica com EDS, comprovou a ampla

formação de metacaulinita, com a calcinação flash, mantendo a morfologia lamelar da caulinita original.

Os resultados dos ensaios de atividade pozolânica com a cal e com o cimento nas idades de 24, 48 e 72 horas, indicaram que o estéril de metabásica apresentou um melhor desempenho em relação ao filito, além de ter um índice de aumento de resistência mais expressivo que o filito. Desta forma, o autor concluiu que o estéril de metabásica adquire atividade pozolânica após ser calcinado, em contrapartida, o estéril de filito não alcançou os requisitos da NBR 12653 (2014), desta forma, não exibiu atividade pozolânica.

Yellishetty *et al.* (2008) avaliaram o reaproveitamento de estéril como agregado graúdo para produção de concreto na Índia. O estéril indiano é conhecido por apresentar fases minerais ácidas com alta concentração de metais pesados. Foram realizados ensaios em quatro amostras coletadas em diferentes mineradores para verificação das propriedades físicas do estéril e da resistência à compressão do concreto com estéril aos 7, 14 e 28 dias. De acordo com os pesquisadores, cerca de 50% do estéril apresentou granulometria dentro da faixa utilizável como agregados para confecção de concreto e 20% está na faixa de material areia-silte-argila, para ser utilizado na fabricação de tijolos. O módulo de finura para os agregados graúdos variou entre 7,5 e 8 e para o agregado miúdo entre 3,2 e 3,5. A absorção de água variou de 5,59% a 13,10%, a densidade aparente variou de 1250 kg/m³ a 1400 kg/m³ e a resistência à abrasão de 28,6% a 30%. A resistência à compressão dos concretos com agregados graúdos de estéril foi superior a resistência do concreto com agregado de granito aos 28 dias. O incremento na resistência foi justificado pelos autores pelo efeito de cura interna pelo qual a água do agregado é gradualmente liberada no concreto para hidratar ainda mais o cimento e a presença de ferro em concentração mais altas.

Gayana e Chandar (2018) desenvolveram um estudo sobre a adequação de estéril de minério de ferro indiano para substituição parcial de agregados graúdos em pavimentos de concreto. Foram avaliadas as propriedades físicas do estéril e a resistência à compressão de concreto produzido com diferentes teores de substituição de agregado graúdo de granito por estéril. A densidade aparente do estéril foi de 1354 kg/m³, a absorção de água de 0,45% e a abrasão foi de 12,80%. A composição química de SiO₂, CaO, Al₂O₃ e Fe₂O₃ foi de 42,86%, 7,38%, 4,64% e 33,52% respectivamente. Foram adotadas substituições de brita por estéril de 20%, 40%,

60%, 80% e 100% além da mistura de referência com 0% de estéril para a produção de concreto. Foram realizados ensaios de resistência a compressão aos 3, 7, 14, 28 e 90 dias. Os autores constataram que a substituição de 40% de brita por estéril produziu maior resistência à compressão em comparação com a mistura de controle, e que a resistência à compressão foi ascendente até este teor de substituição.

Vilela *et al.* (2020) estudaram a aplicação de estéril brasileiro na produção de tijolos de solo-cimento, com diferentes percentuais de substituição de solo por estéril (0%, 10%, 20%, 30% e 40%). Foram realizadas caracterização físico-química do estéril proveniente de Mariana, Minas Gerais. Este estéril possui 52% de argila, 16% de silte e 32% de areia, com um pH de 6,8 e perda ao fogo de 0,46%. A massa específica foi de 2703 kg/m³ e a área superficial foi de 193,2 m²kg⁻¹. O conteúdo de SiO₂ foi de 84,79%, de Al₂O₃ de 0,21% e de Fe₂O₃ de 14,52%. O índice de atividade pozolânica do estéril com cimento foi de 83,33%. A análise de difração de raios X indicou a predominância de hidróxido de ferro (geotita) e alumínio (gibbsita), aluminossilicatos (feldspato e quartzo) e caulinita como principais argilominerais. Os resultados da pesquisa indicaram que o resíduo de mineração influenciou positivamente a densidade dos tijolos de cimento no solo. Além disso, até 40% dos resíduos poderiam ser incorporados ao tijolo, sendo uma alternativa adequada e viável.

Por fim, Shamsi e Zakerinejad (2023) investigaram a utilização de estéril iraniano em misturas asfálticas. Foram realizados ensaios de caracterização físico-químico do estéril. O diâmetro médio de 30% das partículas (D₃₀) foi menor que 0,075 mm, e 90% das partículas (D₉₀) tinham menos de 1 mm de tamanho. Para a determinação da absorção de água e da densidade, a amostra foi dividida em agregado miúdo (0,075 mm a 2,36 mm) e graúdo (>2,36 mm). A absorção de água foi de 1,2 % para agregados miúdo e 0,8-0,9% para agregado graúdo. A densidade específica dos grãos e densidade aparente foi de 2,53-2,63 g/cm³ e 2,61-2,71 g/cm³, respectivamente, para o agregado miúdo e de 2,62-2,66 g/cm³ e 2,68-2,72 g/cm³ para o agregado graúdo. A abrasão do estéril foi de 12% e de acordo com o teste de limite de Atterberg o estéril não é plástico. E a composição química de SiO₂, CaO, Al₂O₃ e Fe₂O₃ foi de 43,15%, 7,20%, 15,79% e 24,78% respectivamente. Os pesquisadores verificaram que todas as amostras de estéril atenderam aos requisitos mínimos das especificações técnicas com baixos riscos químicos de usar em larga escala. E

concluíram que o estéril pode ser usado com sucesso em camadas de pavimentação, mesmo sob condições de tráfego intenso.

1.3 Compósito Cimentício Reforçado com fibras (FRCC)

1.3.1 Comportamento *strain-softening* e *strain-hardening*

Os compósitos cimentícios convencionais reforçados com fibras (CCRF, ou em inglês, FRCC) apresentam um comportamento de amolecimento quando submetidos a esforços de tração (do inglês *strain-softening*). Neste tipo de comportamento, ilustrado na Figura 7, a tensão de tração pós-fissuração máxima (σ_{pc}), é inferior à tensão de primeira fissura (σ_{cc}). Outra característica deste tipo de compósito é o surgimento e desenvolvimento de uma única fissura sob esforços de tração direta. Para o FRCC alcançar o comportamento de endurecimento (em inglês, *strain-hardening*), a tensão de tração pós-fissuração máxima deve ser maior ou igual a tensão de primeira fissura. Durante esta fase de endurecimento, ocorre a formação de múltiplas fissuras e as fissuras permanecem estáveis (em um certo nível de espaçamento e abertura média de fissuras) (NAAMAN, 2018; NAAMAN e REINHARDT, 2006).

Vale a pena destacar que, no trecho de comportamento *strain softening*, não ocorre a formação de novas fissuras, apenas a abertura de uma fissura crítica. A ruptura do compósito ocorre pelo arrancamento das fibras da matriz ou pela ruptura da fibra, sendo este o modo mais comum. Além disso, a matriz pode contribuir com alguma resistência ao longo dessa parte da curva, até uma certa abertura de fissura, mas a sua contribuição é considerada insignificante (NAAMAN, 2018; NAAMAN e REINHARDT, 2006).

Na curva tensão de tração x deformação, indicada na Figura 7, as curvas de FRCC e SHCC são similares na região inicial (trecho OA) e na região final (trecho BC), trecho com o comportamento de *strain softening*. A diferença entre os dois materiais consiste na porção adicional (trecho AB) presente nos compósitos do tipo HPFRCC, que possuem o comportamento *strain hardening* (NAAMAN, 2002; NAAMAN, 2003). De acordo com Li (2019), a capacidade de deformação de um FRCC, com

comportamento *strain softening*, é de cerca de 0,01%. Para um concreto de ultra alto desempenho (UHPCC), esta capacidade de deformação é de até 0,2% e para um compósito cimentício otimizado (ECC) este valor pode chegar a 8%, conforme será apresentado em mais detalhes no item 1.4.

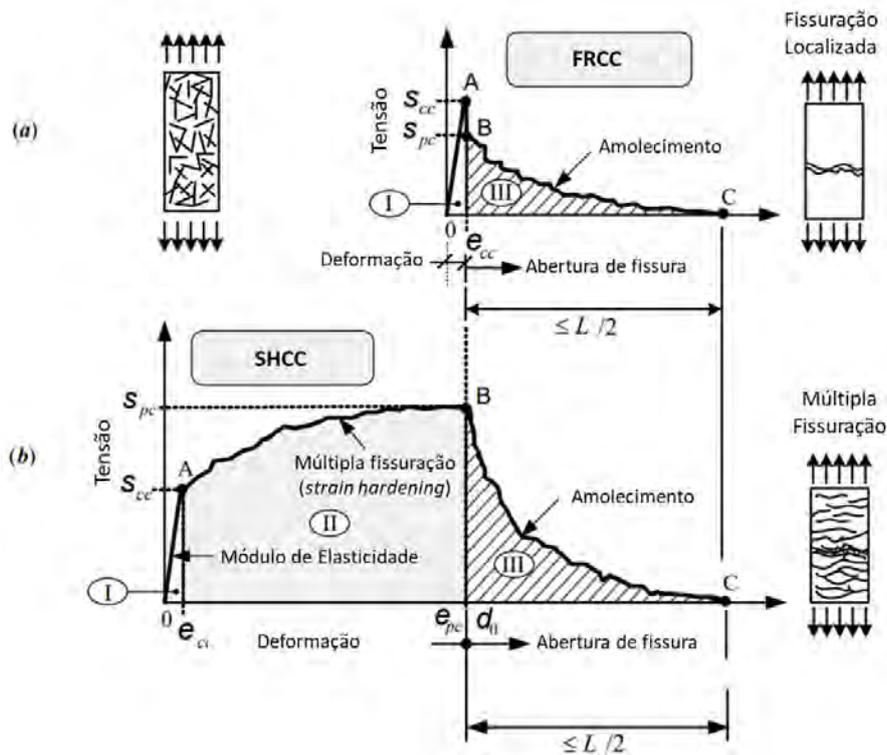


Figura 7 – Comparação típica tensão x deformação entre FRCC (a) e SHCC (b), sob tração direta (Fonte: Adaptado de Naaman e Reinhardt, 2006).

Assim como ocorre sob tração, os FRCC podem apresentar um amolecimento (do inglês *deflection softening*) ou um endurecimento (do inglês *deflection hardening*), quando submetidos a esforços de flexão (Figura 8). Vale destacar que para o FRCC apresentar um comportamento *deflection hardening* quando submetido a esforços de flexão, é necessária uma menor quantidade de fibras, do que para obter o comportamento *strain hardening* sob esforços de tração (JCI, 2002).

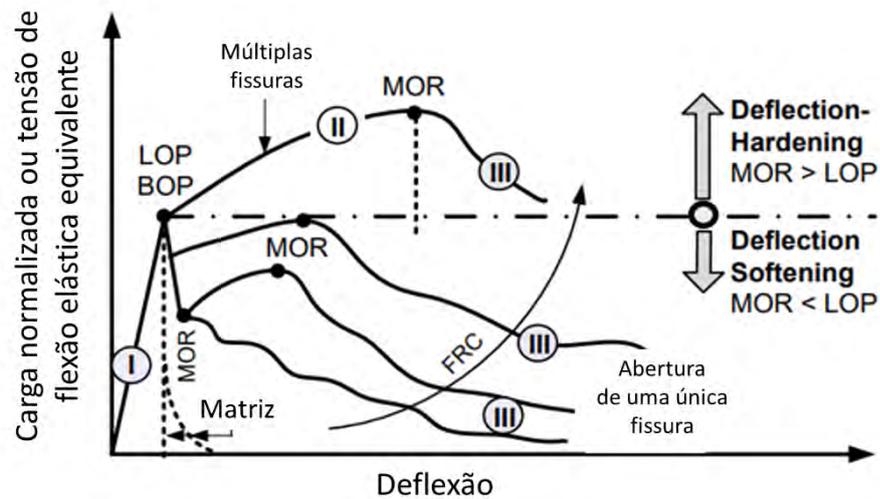


Figura 8 – Resposta esquemática à flexão de todos os FRCC (Fonte: Adaptado Naaman, 2018).

Tendo em vista os conceitos expostos acima, Naaman (2008) apresentou uma classificação para os compósitos com base no seu comportamento sob esforços de tração e flexão, que é ilustrada na Figura 9. Todos os compósitos com comportamento *strain hardening* possuem comportamento *deflection hardening*, já os compósitos com comportamento *strain softening* podem apresentar comportamento *deflection hardening* ou *deflection softening* quando submetidos a esforços de flexão.

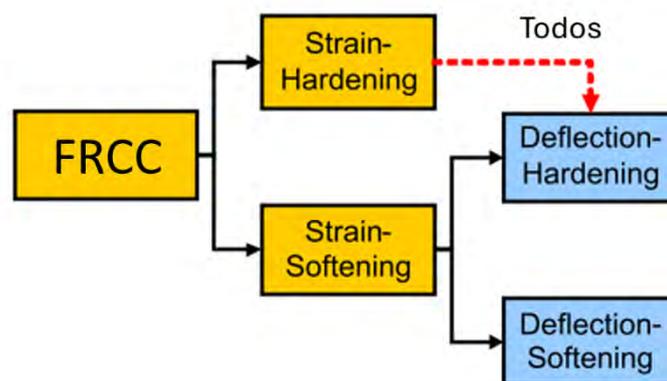


Figura 9 – Classificação dos compósitos em relação à resposta tensão x deformação na tração e suas implicações na flexão (Fonte: Adaptado de Naaman, 2008).

1.4 Compósito Cimentício Otimizado (ECC)

O compósito cimentício otimizado (ECC) foi desenvolvido por Li e sua equipe no início da década de 1990 (LI, 1992; LI, 1993). Em 2006, o comitê técnico do RILEM TC HFC nomeou esta classe de materiais como compósitos cimentícios com endurecimento (ou enrijecimento) na tração (SHCC) (WITTMANN *et al.*, 2007).

O ECC é um compósito cimentício reforçado com fibras (FRCC) com elevada capacidade de deformação de tração, que pode variar de 2% a 8%, o que representa cerca de 200 a 800 vezes a deformação de um concreto convencional, conforme é ilustrado na Figura 10 (LI, 2002; ZHOU *et al.*, 2012; WEIMANN e LI, 2003; LI, 2019). Sua curva tensão vs. deformação à tração apresenta um comportamento *strain hardening* quando submetido a esforços de tração, sendo semelhante a curva de um material metálico, pois a deformação volumétrica inelástica do ECC é análoga à deformação plástica de escoamento de um metal dúctil (SAID *et al.*, 2015b; LI, 2019).

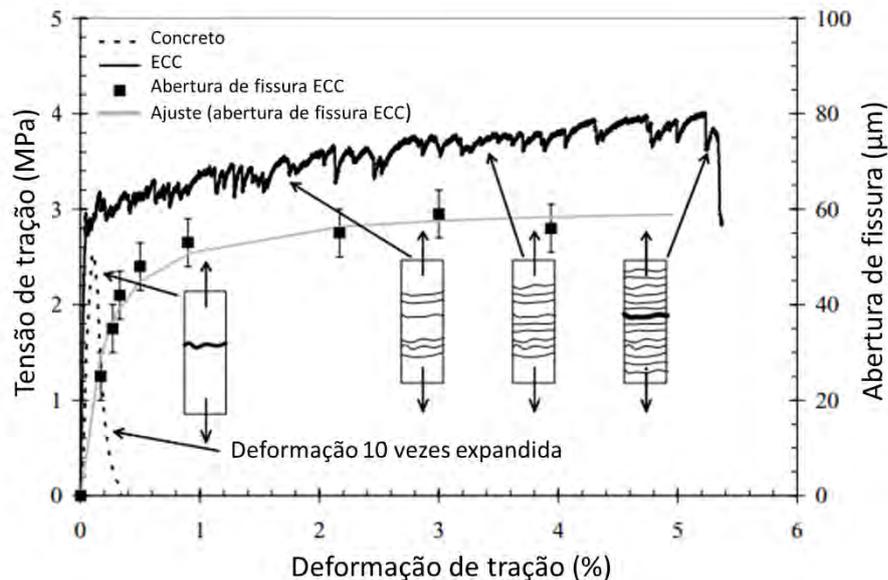


Figura 10 – Curva tensão-deformação de tração e controle da abertura de fissura do ECC (Fonte: Weimann e Li, 2003).

Durante o processo de formação de múltiplas fissuras, as fissuras permanecem com abertura controlada em menos de 100 µm, em geral entre 60 µm e 80 µm, permitindo o aumento da ductilidade na tração do ECC (PAN *et al.*, 2015; LI *et al.*, 2001; WEIMANN e LI, 2003). As múltiplas fissuras no ECC são devidas as fibras, que

atuam como pontes de transferência de tensão nas bordas das fissuras, até a fibra desprender da matriz por deslizamento (LI, 2019). Além do efeito de ponte pelas fibras, a abertura reduzida da fissura no ECC endurecido é resultado da tenacidade de fratura da matriz controlada, e de propriedades otimizadas na interface fibra-matriz (BOOYA *et al.*, 2020). Dessa forma, a reduzida abertura de fissura contribui para a maior durabilidade do ECC, uma vez que não altera a permeabilidade e a entrada de agentes agressivos, podendo prolongar a vida útil das estruturas e reduzir os custos de manutenção e reparo (WEIMANN e LI, 2003, LEPECH e LI, 2009b; LI, 2007; SAHMARAN *et al.*, 2008).

O ECC também tem como característica ser autocicatrizante, pois as partículas cimentícias não reagidas, após a fissuração e expostas à hidratação criam um produto cimentício, que se estenderá e preencherá as fissuras, conforme é apresentado na Figura 11 (MINARD, 2009; LEPECH e LI, 2009b). Há registros na literatura do uso de partículas superabsorventes (SAP) no ECC para melhorar sua durabilidade através da autocicatrização engenheirada (HEEDE *et al.*, 2018). Vale ressaltar que a autocura só pode ser levada em consideração quando a abertura da fissura é pequena, geralmente inferior a cerca de 150 μm (YILDIRIM *et al.*, 2014; SAHMARAN *et al.*, 2013; SAHMARAN *et al.*, 2014; SAHMARAN *et al.*, 2015).

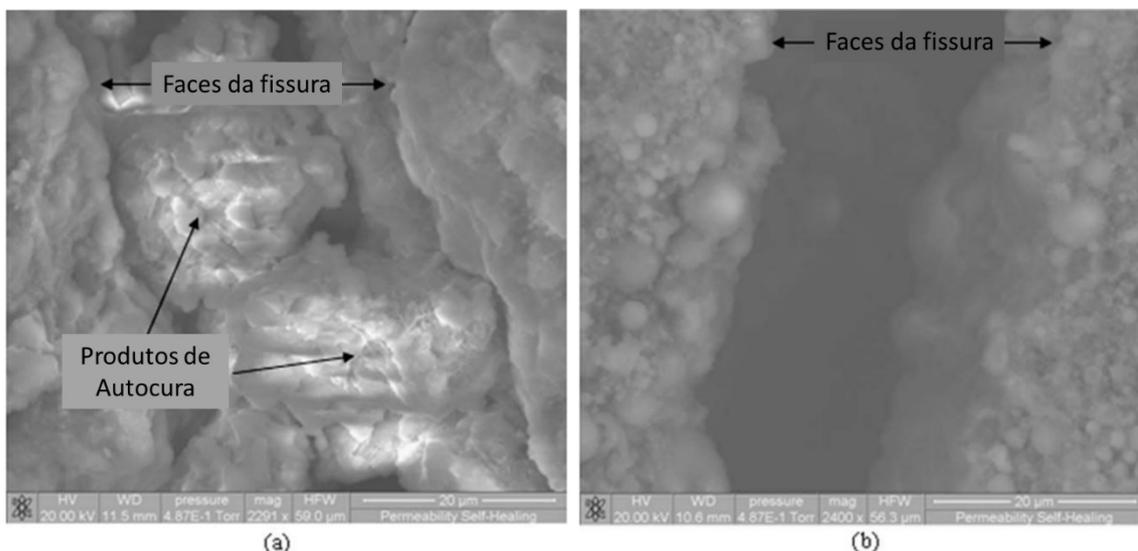


Figura 11 – (a) Formações cristalinas autógenas em fissura do ECC e (b) fissuras no ECC (Fonte: Lepech e Li, 2009b).

Na Figura 12 é apresentada uma comparação da curva tensão vs. deformação à tração do ECC convencional, do ECC de alta resistência e do concreto de alta resistência (UHPC) submetido à esforços de tração, também são apresentados os valores de resistência à compressão, entre parênteses. Verifica-se que os dois tipos de ECC possuem elevada ductilidade, diferente do UHPC.

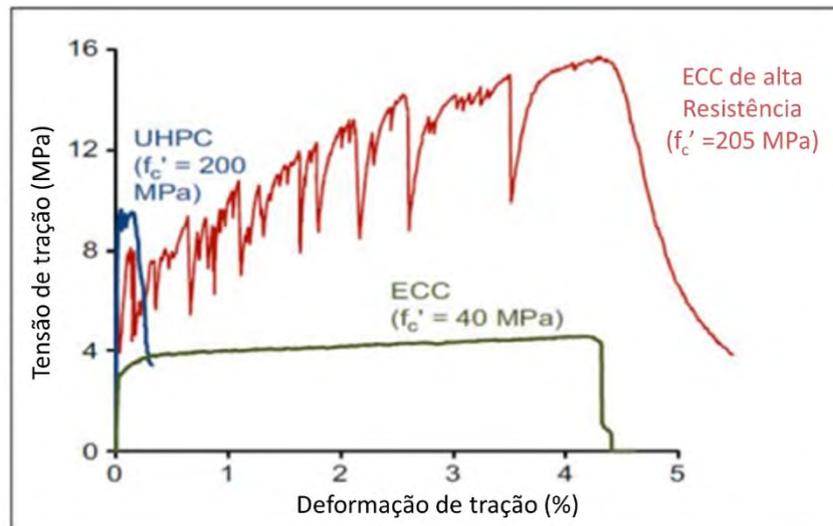


Figura 12 – Comparação da curva tensão versus deformação do ECC convencional, do ECC de alta resistência e do UHPC (Fonte: Li, 2019).

A base de projeto do ECC é diferente de um UHPC em que a alta resistência à compressão é obtida através do empacotamento das partículas, assim como é diferente do FRCC convencional, onde o aumento da deformação ocorre com o aumento do volume de fibras. Para o FRCC atingir a deformação do ECC seria necessário um alto teor de fibras, o que resultaria em uma baixa trabalhabilidade da mistura fresca e formação de novelos, além de elevar o custo para a fabricação do compósito, tornando-o inviável (LI, 2019; CHANH, 2005; SAID *et al.*, 2015a, NAAMAN, 2002). Em contraste, o ECC utiliza um reduzido teor de fibras curtas, de até 2% dispersas de forma aleatória na matriz (SAID *et al.*, 2015b; LI *et al.*, 2022, BANAAAY *et al.*, 2023). Na Tabela 4 é apresentado um resumo comparativo entre o FRC, o ECC e outros HPFRCC.

Tabela 4 – Resumo comparativo entre FRC, ECC e outros HPFRCC (Fonte: Adaptado Banaay *et al.*, 2023).

Propriedades	FRC	ECC	HPFRCC
Volume de fibras (%)	3-12	2	7-20
Matriz	Agregado Graúdo	Cinza volante, sílica ativa e escória	Microsilica, areia de quartzo
Fibras	Qualquer tipo	PVA (entre outras)	Fibras de aço
Propriedades	Strain softening	Strain hardening	Strain hardening
Capacidade de deformação (%)	0,1-2,0	5	<1,5
Abertura de fissura	Ilimitada	<100 μm	Várias centenas de microns

O ECC é projetado com base no ajuste de sua microestrutura para interações sinérgicas entre os componentes microestruturais. As fibras, matriz e a interface fibra com a matriz são projetadas para interagir umas com as outras, de uma certa maneira prescrita, quando o compósito é carregado (LI *et al.*, 2023; LI, 2019).

O objetivo do modelo teórico é justamente estabelecer critérios e parâmetros para alcançar o endurecimento na tração, utilizando um teor mínimo de fibras. Dentre os critérios tem-se o critério da resistência de fissuração da matriz e o critério de energia para a propagação de fissuras. O critério de resistência consiste em um limite na tensão de tração quando ocorre o início da fissura, a partir de uma falha preexistente na matriz. A fase de propagação das fissuras corresponde ao critério da energia, no qual é avaliado o modo de propagação de fissura para preservar a integridade da transferência de tensões pelas fibras, durante a extensão e abertura da fissura. Se qualquer um desses critérios não for atendido, não será alcançado o comportamento *strain hardening* (LI, 1993; LIN e LI, 1997; LI *et al.*, 2002).

A resistência à fissuração da matriz é função da tenacidade à fratura da matriz e do tamanho das falhas preexistentes na matriz (tais como vazios de ar), mas pode depender da aderência fibra-matriz. O modo de propagação de fissuras no ECC (Figura 13b) ocorre de forma distinta do concreto convencional e do FRCC, que seguem o modo de Griffith (Figura 13a). Este modo não é adequado para múltiplas fissuras, uma vez que o aparecimento de uma fissura na matriz segue o descarregamento contínuo (amolecimento) da amostra, eliminando a possibilidade de

iniciar outra fissura a partir de um local de uma falha menor em um nível mais alto de carregamento (LI *et al.*, 2023; LI, 2019; LEPECH e LI, 2009a).

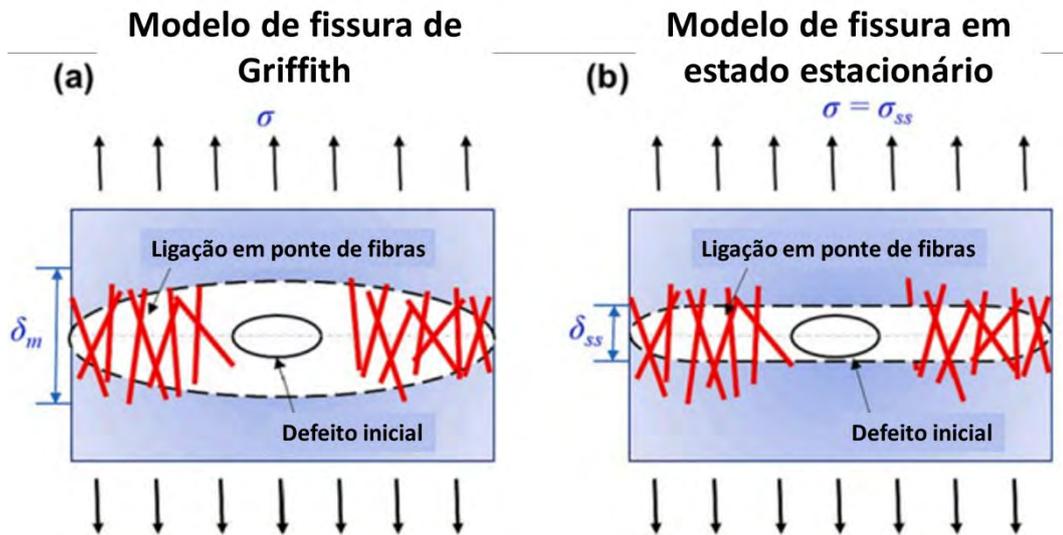


Figura 13 – Ilustração do modo de fissura de Griffith (a) (modificado) e (b) do modo de fissura em estado estacionário (Fonte: Li *et al.*, 2023).

Para o ECC, o modo de propagação de fissuras tem como base o modelo de Marshall e Cox (1988) e é calculado pela Equação 1. Neste modo, exceto por uma pequena região próxima à ponta da fissura, a fissura é essencialmente plana com uma abertura constante de fissura δ_{ss} sob uma carga constante σ_{ss} . Durante a propagação de fissura plana em estado estacionário, a carga e a abertura da fissura permanecem constantes, enquanto o comprimento da fissura se estende indefinidamente (LI, 2019; KANDA e LI, 2006).

$$\sigma_{ss} \cdot \delta_{ss} - \int_0^{\delta_{ss}} \sigma(\delta) d\delta = J_{tip} \quad \text{Equação 1}$$

onde J_{tip} representa a tenacidade da matriz na ponta da fissura e aproxima-se de K_m^2/E_m para fibras curtas. K_m e E_m são a tenacidade a fratura e o módulo de elasticidade da matriz, respectivamente, $\sigma(\delta)$ representa a relação tensão versus abertura de fissura, e δ_{ss} é a abertura de fissura em estado estacionário, correspondente à tensão transferida pelas fibras em estado estacionário σ_{ss} .

O termo $\sigma_{ss} \cdot \delta_{ss}$ representa o trabalho realizado pela carga aplicada no compósito durante o processo de fissuração em estado estacionário. Parte desta

energia é consumida pelas fibras que costuram a fissura à medida que a fissura se propaga da abertura zero (na ponta da fissura) até a abertura em estado estacionário δ_{ss} , correspondendo ao termo da integral da Equação 1. A energia restante disponível é consumida pelos processos de ruptura da matriz que dissipam a energia na ponta da fissura, ou seja, o termo J_{tip} .

Vale ressaltar que a energia complementar máxima J'_b deve exceder a tenacidade da matriz J_{tip} para que ocorra a formação de múltiplas fissuras ($\sigma_o \cdot \delta_o - \int_0^{\delta_o} \sigma(\delta) d\delta = J'_b \geq J_{tip}$), conforme é indicado na Figura 14, caso contrário, ocorre o modo de Griffith. Há duas alternativas para isso, a primeira é limitar a resistência da matriz J_{tip} , que depende dos materiais da matriz, e a segunda consiste em aumentar J'_b . Foi determinado experimentalmente por Kanga e Li (2006), para misturas com fibras de PVA, que para obter um comportamento *strain hardening* são necessárias que as relações $\sigma_o/\sigma_{fc} \geq 1,3$ e $J'_b/J_{tip} \geq 2.7$ sejam atendidas. Estas considerações fornecem diretrizes de projeto para a fibra e interface do ECC (LI, 2019; KANDA e LI, 2006).

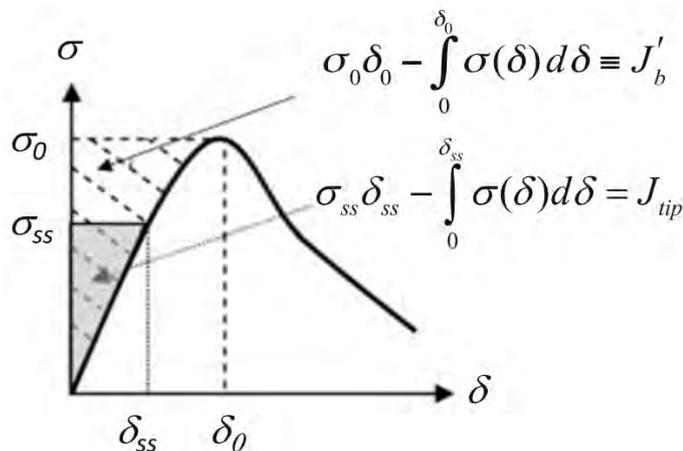


Figura 14 – Curva típica tensão versus abertura de fissura (Fonte Li, 2019).

1.4.1 Propriedades mecânicas do ECC

O ECC pode ser dividido em quatro amplas classes, relacionadas à resistência à compressão: resistente ao fogo (FR-ECC), leve (LW-ECC), ECC normal e com alta resistência (HS-ECC) (Tabela 5 e Figura 15). Observa-se que todos os quatro tipos

de ECC possuem capacidade de deformação por tração superior a 2%, com exceção do limite inferior do FR-ECC. Ainda na Figura 15, é apresentada uma comparação do concreto de ultra alta resistência (UHPC) com as quatro classes de ECC, nota-se que, diferente do UHPC, o HS-ECC consegue alcançar tanto elevada capacidade de deformação à tração quanto elevada capacidade de deformação.

Tabela 5 – Quatro classes de ECC e suas faixas de propriedades correspondentes (Fonte: Li, 2019).

Propriedade	FR-ECC	LW-ECC	Normal-ECC	HS-ECC
Densidade ρ (kg/m ³)	550	930-1800	1800-2100	2300-2400
Módulo de Elasticidade E (MPa)	4-6	8-12	15-23	41-48
Tensão de primeira fissura σ_{fc} (MPa)	0,8-1	2-4	3-5	8-10
Resistência última σ_{ult} (MPa)	1-1,5	2-5	4-8	14-17
Capacidade de deformação na tração (%)	1-3	2-4	2-8	3-8
Resistência à compressão f'_c (MPa)	2,5-3,5	20-40	30-80	120-205
Capacidade de deformação na compressão ϵ_{ult} (%)	-	-	0,4-0,5	0,3-0,4
Resistência a flexão	-	-	10-16	28-32
Aplicação	Proteção contra o fogo de estruturas metálicas	Aplicações leve	Uso estrutural	Estruturas resistentes à impactos e explosões

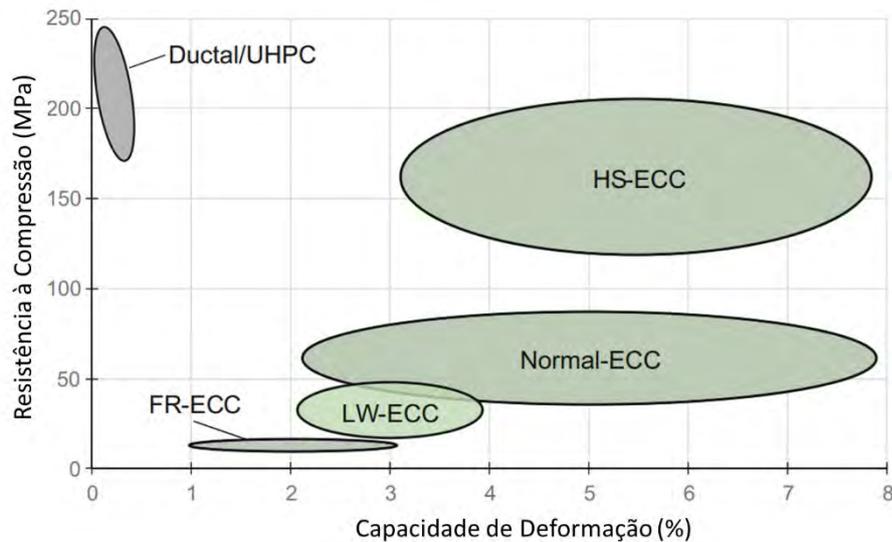


Figura 15 – Relação entre a ductilidade e a resistência à compressão do ECC (Fonte: Adaptado Li, 2019).

Conforme foi apresentado no Item 1.4, a curva tensão versus deformação do ECC submetido a esforços de tração (Figura 10) possui comportamento de endurecimento à tração (*strain hardening*) com a formação de múltiplas fissuras estáveis. O limite elástico do ECC é um pouco menor que a resistência à primeira fissura. Entre estes dois pontos, a partir de uma falha interna maior, semelhante a uma fissura na amostra, inicia-se a extensão da microfissura, conforme a intensidade da tensão neste local é igual à tenacidade à fratura da matriz. Esta extensão é normalmente estável para uma carga constante, devido à transferência de cargas pelas fibras. À medida que a tensão de tração atinge a resistência à fissuração, uma microfissura na matriz propaga-se instantaneamente por toda a seção transversal da amostra. Em seguida, há uma ligeira queda na tensão de tração à medida que a capacidade de transferência de carga da matriz é subitamente perdida. No entanto, a capacidade de transferência de tensões pelas fibras não é excedida na tensão de ruptura da matriz, e a tensão de tração não só é recuperada, mas excede essa resistência com o aumento da tensão de tração, prosseguindo com o endurecimento por deformação e a formação das microfissuras (LI, 2019).

A resistência à tração pós-fissuração (tensão última) de várias versões do ECC relatada em literatura, projetada para atender diferentes requisitos estruturais, pode variar de 1 a 17 MPa, a depender da classe de ECC adotada, conforme foi ilustrado

na Tabela 5. De forma geral, a sua capacidade de deformação é superior a 2%, podendo alcançar cerca de 8%.

O seu comportamento na tração direta é fortemente influenciado pelo tamanho e geometria da amostra (YU *et al.*, 2018a). Nos ensaios de tração uniaxial são utilizadas as amostras do tipo halter ou osso, conforme é recomendado pela JSCE (2008). Quando a geometria do corpo de prova é alterada de halter para a forma cilíndrica, a resistência a tração diminui assim como a ductilidade. Isto ocorre devido ao efeito de variação na orientação das fibras e singularidade de tensões (KESNER *et al.*, 2003; MECHTCHERINE *et al.*, 2011). Todavia, a espessura da amostra tem efeito insignificante nas propriedades de tração (ROKUGO *et al.*, 2007).

O comportamento tensão-deformação do ECC depende de sua idade (Figura 16) e à medida que há hidratação contínua na matriz do ECC, ocorre a mudança na capacidade de deformação à tração. Isso ocorre devido a mudanças na tenacidade à fratura da matriz e das propriedades de interação fibra/matriz com a idade (WANG e LI, 2005). Nas primeiras idades (até 10 dias), a ligação interfacial fibra/matriz cresce rapidamente e com isso há um aumento na capacidade de transferência de tensões da fibra para a matriz. Embora a tenacidade à fratura da matriz também aumente, essa taxa é mais lenta que a da aderência fibra-matriz, o que aumenta a ductilidade à tração. A aderência fibra/matriz, que é dominada pela ligação química de PVA-ECC, atinge o seu valor máximo aos 10-14 dias de idade (WANG, 2005), no entanto, a tenacidade à fratura da matriz continua a aumentar significativamente além de 14 dias devido à hidratação contínua e redução da porosidade, e ocorre, portanto, uma redução na ductilidade à tração. A tenacidade à fratura da matriz estabiliza em média aos 90 dias, resultando na estabilização da capacidade de deformação por tração do ECC (LI, 2019).

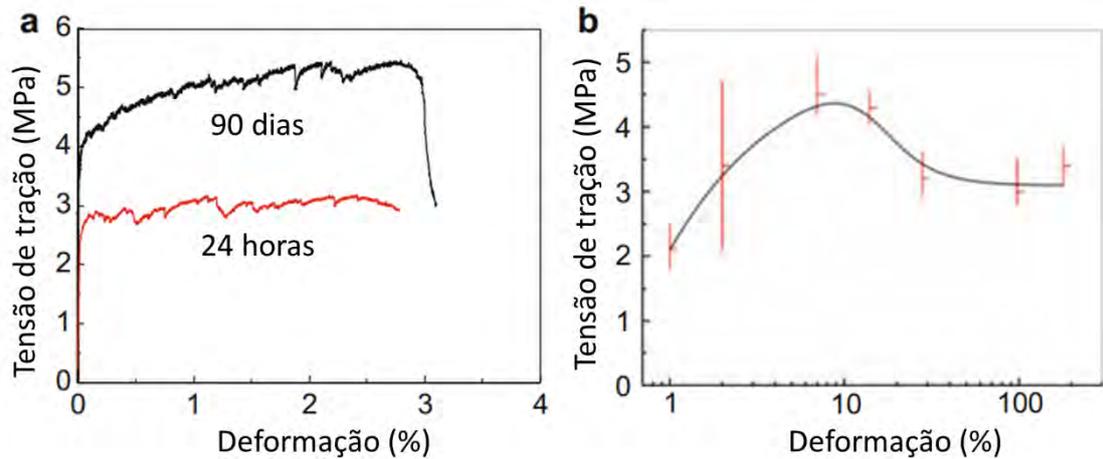


Figura 16 – Influência do tempo na (a) curva tensão-deformação do ECC e (b) capacidade de deformação à tração (Fonte: Adaptado de Wang e Li, 2005).

As estruturas podem ser carregadas com diferentes taxas de deformação. O concreto possui sensibilidade à taxa de deformação e com isso suas propriedades mecânicas mudam com a taxa de carregamento. No caso do ECC, quando submetido à elevadas taxas de deformação, sua resistência à tração aumenta, enquanto sua capacidade de deformação diminui (LI, 2019). A fonte da sensibilidade à taxa do ECC pode vir da sensibilidade à taxa de deformação da fibra, matriz ou interface fibra/matriz (YANG e LI, 2012). Com isso, a fragilidade do ECC aumenta com o aumento da taxa de carregamento, o que é desfavorável à alta demanda de absorção de energia, quando as estruturas do ECC são submetidas a cargas de impacto (YU *et al.*, 2018a).

A ductilidade à tração também se traduz em grandes diferenças no comportamento de flexão, cisalhamento e fadiga do ECC quando comparado com o concreto normal. Em geral, a resistência ao cisalhamento do ECC está na mesma ordem de grandeza da resistência à tração uma vez que a carga de cisalhamento pode ser representada por uma combinação de tensão diagonal e carga de compressão. Além disso, a resistência à flexão do ECC é cerca de 3 a 4 vezes maior que a resistência à primeira fissura, enquanto no concreto essas tensões são aproximadamente iguais. Um ponto interessante a destacar é que a resistência à flexão do ECC é na mesma escala que a da madeira (LI, 2019).

Em relação à resistência à compressão do ECC, elas variam em média de 10 a 150 MPa a depender do tipo de aplicação desejada (LI, 2019). Todavia, há registro de ECC com resistência à compressão de 205 MPa e 3% de capacidade de

deformação por tração (RANADE, 2014). Apesar de alcançar superioridade em termos de resistência à compressão quando comparado ao concreto convencional, o ECC apresenta módulo de elasticidade menor que o concreto para a mesma resistência, devido à ausência de agregados graúdos na mistura, o que acaba resultando em uma maior deformação (SAID *et al.*, 2015b; KANG e BOLANDER, 2017; MENG *et al.*, 2017).

O comportamento típico de tensão-deformação do ECC sob carga de compressão é mostrado na Figura 17. De acordo com Li (2019) e Zhou *et al.* (2015), para o ECC convencional, o trecho linear elástico vai até cerca de 40–50% da tensão de pico e para o ECC de ultra alta resistência esse valor vai até 80% da tensão de pico. Após esta fase, a curva tensão-deformação crescente do ECC torna-se cada vez mais inelástico com a formação de fissuras verticais estabilizadas devido as fibras, resultando em uma resposta mais dúctil até o pico, em vez de um pico agudo, normalmente observado em concreto não reforçado e concretos reforçados com fibras. No pico, ocorre a divisão axial da matriz devido à junção de múltiplas microfissuras. No entanto, a tensão pós-pico não cai para próximo de zero, mas para um valor de tensão residual com cerca de metade da carga de pico. Depois disso, o aumento da deformação faz com que as fissuras verticais se abram mais, resultando na diminuição da capacidade de transferência de cargas pelas fibras e, portanto, na diminuição da tensão de compressão. De forma geral, o ECC apresenta um comportamento extremamente dúctil sob compressão devido à estabilização eficaz de fissuras e efeitos de ponte pelas fibras, durante todo o carregando. No ponto de carga máxima, as deformações de compressão variam de 0,25% a 0,6% (dependendo da resistência à compressão e ligação fibra/matriz) e a capacidade de carga residual é de até 1% (ZHOU *et al.*, 2015).

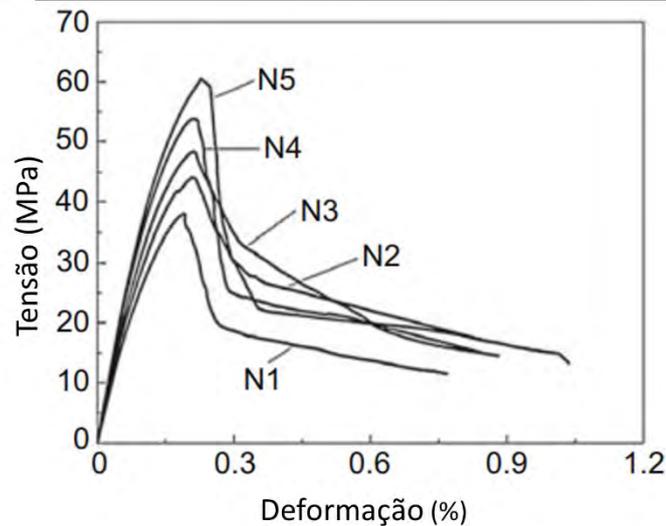


Figura 17 – Comportamento do ECC submetido a esforço de compressão (Fonte: Adaptado Zhou *et al.*, 2015).

1.4.2 Materiais utilizados na fabricação do ECC

Os materiais utilizados na produção de ECC em geral são: cimento, adições minerais, agregados miúdos, fibras, água e aditivos químicos. Não são utilizados agregados graúdos, pois sua presença tende a aumentar a tenacidade à fratura da matriz e a dispersão das fibras, o que reduz o desenvolvimento de múltiplas fissuras e o comportamento de endurecimento sob esforços de tração (COSTA, 2024). Em comparação com as misturas de concreto convencionais, o ECC requer um maior teor de materiais cimentícios para controlar a aderência interfacial. Em média são utilizadas de duas a três vezes a quantidade de cimento utilizada no concreto convencional (MAGALHAES *et al.*, 2014; MAGALHAES, 2010).

Shanmugasundaram *et al.* (2021a) revisaram diferentes composições do ECC, a partir de publicações na literatura. Foram avaliadas até 180 composições com 17 tipos de fibras (Figura 18), 11 tipos de adições minerais (Figura 19) e 6 tipos diferentes de agregados finos (Figura 20). Percebe-se que, o uso de fibras de álcool polivinílico, PVA, (54%), cinza volante (62%) e areia de microsílca (43%) são os materiais mais utilizados pelos pesquisadores devido às suas melhores propriedades e alta disponibilidade.

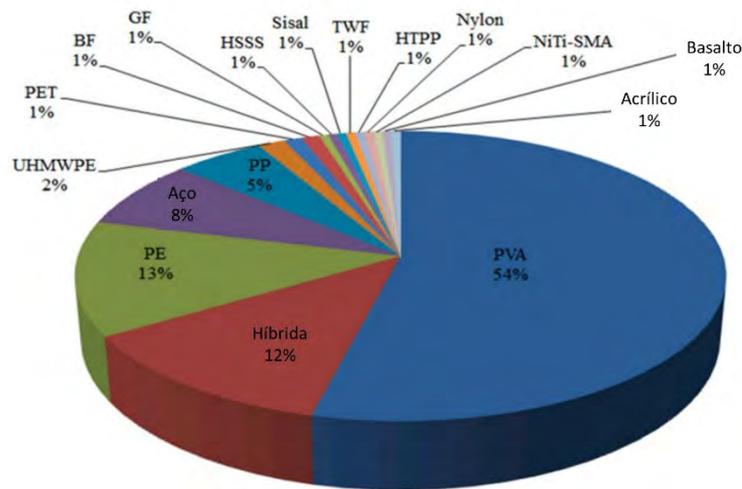


Figura 18 – Porcentagens de estudos usando fibras em ECC (Fonte: Adaptado Shanmugasundaram *et al.*, 2021a).

Nota: UHMWPE - Fibra de polietileno de ultra-alto peso molecular, BF – fibra de basalto, GF – fibra de vidro, HSS – fibra de aço inoxidável de alta resistência, twf – fibra de pneu, HTPP – fibra de polipropileno de alta tenacidade e NiTi-SMA - fibra de liga com memória de forma de níquel titânio.

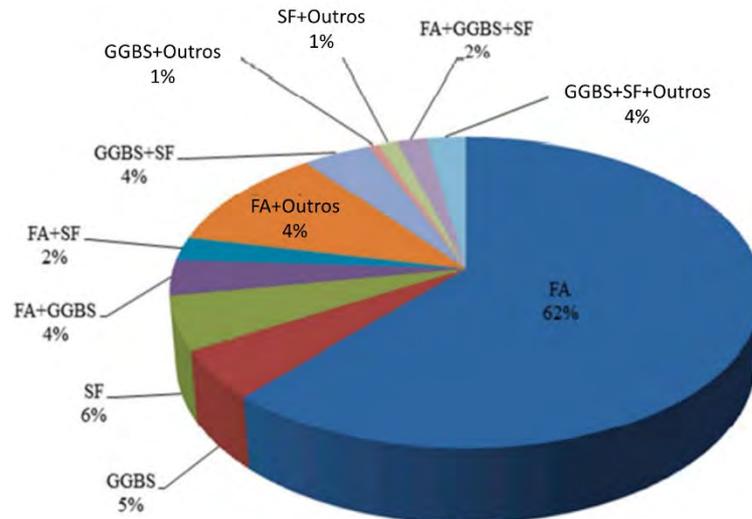


Figura 19 – Porcentagens de estudos usando diferentes adições minerais no ECC (Fonte: Adaptado Shanmugasundaram *et al.*, 2021a).

Nota: FA – cinza volante, SF – sílica ativa e GGBS – escória de alto forno.

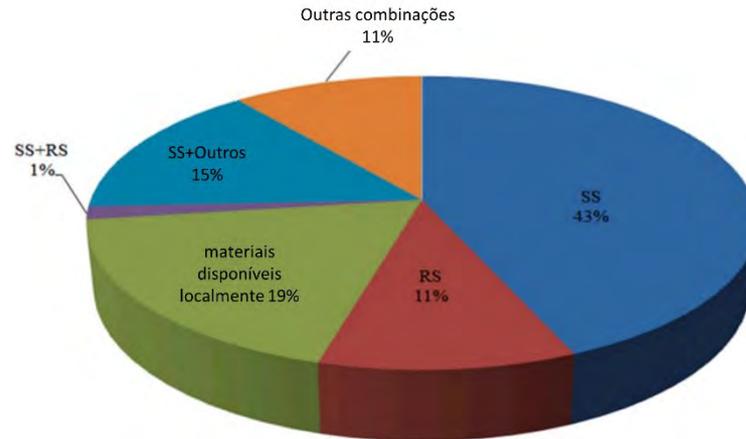


Figura 20 – Porcentagens de estudos usando agregado miúdo em ECC (Fonte: *Adaptado SHANMUGASUNDARAM et al., 2021a*).

Nota: SS – areia de sílica e areia de rio.

Em relação as fibras, além da fibra de PVA (CHOWDARY e ASADI, 2021; MIRCEA *et al.*, 2020; ZHANG *et al.*, 2020a; YU *et al.*, 2020), já foram utilizadas fibra de polipropileno, PP, (SRIKAKULAM e KHED, 2020; ZHU *et al.*, 2020); polietileno, PE, (ZHANG *et al.*, 2020b; ZHOU *et al.*, 2021a; HUANG *et al.*, 2021; WANG *et al.*, 2020d); sisal (REN *et al.*, 2021); basalto (XU *et al.*, 2021b) e aço (WANG *et al.*, 2020d). Também foram encontrados relatos na literatura de hibridização de fibras de PVA com PP (HU *et al.*, 2021, SINGH *et al.*, 2019); PVA com fibras de pneu (MOHAMMED *et al.*, 2018); fibras acrílica com PP e náilon (HALVAEI *et al.*, 2014); fibras de aço com PP (KUMAR e RAGUL, 2018; MANVI e KUMAR, 2017); fibras de aço com PVA (YU *et al.*, 2019a; AL-GEMEEL *et al.*, 2018, WANG *et al.*, 2020e), fibras de basalto com PP e vidro (YAN *et al.*, 2021).

As adições minerais mais utilizadas, além da cinza volante (CHOWDARY e ASADI, 2021; LIU *et al.*, 2017a; MIRCEA *et al.*, 2020; ZHANG *et al.*, 2020a; YU *et al.*, 2020; SRIKAKULAM e KHED, 2020), são sílica ativa (HUANG *et al.*, 2021; HUANG *et al.*, 2020), escória de alto-forno (ZHAO *et al.*, 2017; SINGH *et al.*, 2020), cinza do bagaço de cana (SUBEDI *et al.*, 2022); cinza do resíduo da produção de óleo de palma (ALTWAIR *et al.*, 2012); zeolita (RAZAVI *et al.*, 2021); argila calcinada (YU *et al.*, 2020) e metacaulinita (SILVA, 2023; SANTANA, 2023).

Também são encontradas blendas de cinza volante e sílica ativa (XU *et al.*, 2021a; YU *et al.*, 2019b; KRISHNARAJA e KANDASAMY, 2020); cinza volante e escória de alto forno (ZHU *et al.*, 2012; SHERIR *et al.*, 2015; BANG *et al.*, 2015); cinza

volante, escória de alto forno e sílica ativa (WANG *et al.*, 2020b; WANG *et al.*, 2020c); escória de alto forno e sílica ativa (ZHOU *et al.*, 2021a; YU *et al.*, 2018b); cinza volante e metacaulinita (RANGEL, 2023; ZHANG *et al.*, 2020a); cinza volante, escória de alto forno, sílica ativa e metacaulinita (YAN *et al.*, 2021); cinza volante, sílica ativa e cinza da casca do arroz (ZHANG *et al.*, 2020b); cinza volante e pó de concreto reciclado (WANG *et al.*, 2019c; WANG *et al.*, 2020a); cinza volante e pó de calcário (GUAN *et al.*, 2020; SIAD *et al.*, 2015); cinza volante, metacaulinita e calcário (YU *et al.*, 2018b); escória, calcário e sílica ativa (YU *et al.*, 2018c; DING *et al.*, 2018); sílica ativa e calcário (LEI *et al.*, 2019); cinza volante e pó de vidro (SIAD *et al.*, 2018; HISSEINE e TAGNIT-HAMOU, 2020); cinza volante e microesferas de vidro (AL-GEMEEL *et al.*, 2018); cinza volante, sílica ativa e pó de quartzo (LIEW *et al.*, 2020) e cinza volante e bentonita (ZHAO *et al.*, 2020).

Como agregado miúdo já foram utilizados areia de micro sílica (RAZAVI *et al.*, 2021; MIRCEA *et al.*, 2020; YU *et al.*, 2020), areia de rio (KUMAR e RAGUL, 2018; GUAN *et al.*, 2019; AL-GEMEEL *et al.*, 2018; LIEW *et al.*, 2020), areia de rio e areia industrializada (SRIKAKULAM e KHED, 2020; COSTA, 2024), borracha triturada (MA *et al.*, 2015), areia de rio com borracha triturada (ALALOUL *et al.*, 2020; SABAPATHY *et al.*, 2020), areia de sílica com borracha triturada (WANG *et al.*, 2019c), areia de duna (MENG *et al.*, 2017), areia do mar (HUANG *et al.*, 2021; HUANG *et al.*, 2020); areia de quartzo (WANG *et al.*, 2020b); cinzas pesadas (BANG *et al.*, 2015), areia reciclada do concreto (ZHOU *et al.*, 2021b; ADESINA e DAS, 2021a; HU *et al.*, 2021), resíduo de pó de pedra (SINGH *et al.*, 2020); areia de sílica com vidro reciclado (ADESINA e DAS, 2020; ABID *et al.*, 2023) e asfalto reciclado com areia de sílica (ADESINA e DAS, 2021b).

Para o cimento, foi utilizado cimento Portland comum, cimento Portland com pozolanas, cimento de alta resistência ao sulfato (LIU *et al.*, 2017b) e cimento Portland calcário (com elevado teor de fíler). E, por fim, os aditivos utilizados foram super plastificante, modificador de viscosidade, antiespumante e aditivo incorporador de ar (SHANMUGASUNDARAM *et al.*, 2021a).

As propriedades das fibras que são levadas em consideração no projeto do ECC são a resistência da fibra, o módulo de elasticidade da fibra, seu diâmetro e seu comprimento. A ruptura das fibras é uma consequência direta da tensão de tração no compósito, que excede a resistência da fibra (LI, 2019). De forma geral, o comprimento das fibras varia de 6 mm a 12 mm e o diâmetro de 6µm a 40µm, dependendo do tipo

de fibra utilizada (BANAAY *et al.*, 2023; SRINIVASA e VENKATESH, 2014). Apesar das vantagens das fibras introduzidas nas composições de ECC, o uso excessivo de fibras pode levar à redução da fluidez do ECC fresco e da resistência à compressão, bem como ao aumento da porosidade (BAHRAG *et al.*, 2020). No entanto, o uso de fibras em até 2% em volume em compósitos ECC podem aumentar significativamente a resistência à tração e flexão do ECC (HALVAEI *et al.*, 2013a).

Em relação à matriz cimentícia do ECC, as propriedades da matriz que afetam o comportamento do ECC são a tenacidade à fratura, o módulo de elasticidade e a distribuição do tamanho das falhas (LI, 2019). A tenacidade da matriz depende de seus materiais, diminuindo com o aumento do teor de cinza volante e aumentando com o tamanho das partículas de areia. A redução da tenacidade com o aumento do teor de cinza volante ocorre devido à menor reatividade das cinzas comparadas ao cimento nas primeiras idades, representando uma forma de controlar a energia J_{tip} . Além disso, a cinza volante reduz a aderência química interfacial fibra/matriz e a aderência friccional e, com isso, melhoram a robustez da ductilidade à tração, mantendo uma capacidade de deformação de tração de aproximadamente 3% (MAGALHÃES *et al.*, 2014; SAHMARAN *et al.*, 2009; WANG e LI, 2007). Esta combinação de parâmetros micromecânicos levam a um índice de endurecimento por deformação J_b'/J_{tip} altamente favorável para o endurecimento na tração (PRASHANTHI e NATARAJAN, 2023; LI, 2019). A energia J_{tip} também pode ser reduzida através do aumento da relação água/material cimentício (LI, 2019). Já o aumento da tenacidade com o uso de partículas maiores de areia requer ajustes adequados do material cimentício. Vale destacar que o aumento excessivo da tenacidade da matriz não conduz à um endurecimento por tração (YANG, 2008; SAHMARAN *et al.*, 2009, LI, 2019).

A areia tem um efeito considerável na trabalhabilidade do material, no desempenho mecânico, na rigidez e na estabilidade de volume, auxiliando no controle à retração do ECC (KUMAR *et al.*, 2022; MAGALHÃES, 2010). No ECC é feita uma seleção de partículas finas de areia com granulometria de até 150 μm e módulo de finura de 2, o que é diferente do concreto convencional em que tamanho dos grãos são inferiores a 4,75mm (SAHMARAN *et al.*, 2009; SANDEEP e AMBIKA, 2019; LIU *et al.*, 2018). Na literatura é possível encontrar registros de granulometrias de 200 e 250 μm que forneceram resultados adequados para o ECC (HALVAEI *et al.*, 2013b; CHETHAN *et al.*, 2015b). Vale destacar que o tamanho inadequado da areia pode

reduzir a dispersão da fibra, resultando em transferência de tensões pelas fibras inadequadas, o que pode contribuir para a localização prematura do dano e uma redução na resistência à tração e capacidade de deformação do compósito (MENG, 2017; MAALEJ, 2010).

A seleção inadequada de materiais com diferentes propriedades físicas e químicas, condições de cura e proporções de mistura afetam adversamente as propriedades no estado fresco e endurecidos do ECC, dessa forma, é necessário avaliar o comportamento dos materiais utilizados para alcançar as propriedades desejadas do ECC. À influência das adições minerais nas propriedades no estado fresco e endurecido do ECC é indicada na Tabela 6.

Tabela 6 – Observações sobre a influência de adições minerais nas propriedades das misturas do ECC. (Fonte: Adaptado de Shanmugasundaram *et al.*, 2021a).

Propriedade	Eleva a propriedade	Reduz a propriedade
Trabalhabilidade	Forma esférica da adição	Forma dos grãos irregular
	Efeito rolamento de esferas	
	Baixa capacidade de absorção de água	Alta capacidade de absorção de água
	-	Uso de partícula mais finas
Resistência à compressão	Alta formação de gel CSH, durante o processo de hidratação	Menor densidade de empacotamento e menor atividade pozolânica da adição
	Maior finura da adição	Baixo processo de hidratação, secagem precoce, menor densidade e maior volume de poros na argamassa durante a preparação do ECC, justificados pelo elevado percentual da adição
	Maior aderência devido ao formato irregular da adição	Maior teor de CO ₂
Resistência à tração	-	Porcentagem muito elevada de adição
Resistência à flexão	A alta densidade de empacotamento e presença de alto nível de alumina e sílica nas adições minerais	Menor área de superfície específica da adição
	Menor ligação química da adição	-

1.4.3 Aplicações

Há registros de aplicações do ECC em diversos ramos da engenharia civil, tais como construção, reparo e reabilitação (do inglês *retrofit*) de edifícios, pontes, barragens, muros de contenção, dispositivos de drenagem superficial, entre outros. Shanmugasundaram *et al.* (2021a) citam algumas vantagens, desvantagens e aplicações para o ECC encontradas na literatura as quais são indicadas na Tabela 7.

Yildirim *et al.* (2018) apontam que o comportamento dúctil e a capacidade de autocura do ECC estão associados a muitas propriedades desejáveis para aplicações de reparo e reabilitação. Estas propriedades incluem: (1) alta absorção de energia, resistência ao impacto e deformação inelástica; (2) capacidade de redistribuir tensões localizadas, reduzindo a sensibilidade do material às concentrações de tensões; (3) alta deformabilidade; (4) alta resistência ao cisalhamento; (5) alta resistência de aderência à armadura de aço e ao concreto do substrato; e (6) capacidade de controlar a abertura de fissuras, evitando o aumento resultante das propriedades de transporte que levaria a problemas de durabilidade.

Tabela 7 – Vantagens, desvantagens e aplicações do ECC (Fonte: Adaptado de Shanmugasundaram *et al.*, 2021a).

Aplicações	Vantagens	Desvantagens
Estruturas resistentes a terremotos	Ductilidade e comportamento de strain hardening	O custo inicial é alto
Prédios altos	Maior resistência à compressão e durabilidade que o concreto convencional	Necessidade de mão de obra qualificada
Estruturas resistentes ao ataque químico e de ácidos	Alta capacidade de controle de abertura de fissuras	Menor disponibilidade de materiais especiais, como areia de sílica, fibras e adições minerais como a cinza volante
Estruturas hidráulicas ou exigência de alta durabilidade	Capacidade de autocura	A menor qualidade de cada ingrediente pode afetar a resistência e outras propriedades do ECC
Construção costeiras com climas quentes e áridos	Leve devido ao não uso de agregados graúdos	Menor módulo de elasticidade em comparação com o concreto convencional por falta de agregados graúdos

Aplicações	Vantagens	Desvantagens
Ponte, estradas e pavimento de aeroportos	Reduzida necessidade de uso de reforço no ECC em comparação com o concreto convencional	As seleções de materiais bons e adequados são difíceis de atingir a resistência desejada
Obras de reparação e reabilitação	Alcançar maior resistência em curta duração	A quantidade de cimento aumenta devido à falta de agregado graúdo, o que aumentará o custo e as emissões de gases do efeito estufa
Construção pré-moldada	Alta sustentabilidade com aproveitamento de subprodutos da indústria.	-
Construção com concreto autoadensável	Reduz a poluição do solo com a incorporação de subprodutos em alta porcentagem (1,2 a 1,4%), o que ajudará a reduzir alguns percentuais de gases de efeito estufa	-
Tubulações de alta pressão ou carga	Usado como material de reparo	-

Magalhães (2010) cita que as aplicações mais atrativas deste tipo de material incluem-se a sua utilização em estruturas resistentes a terremotos, as quais devem resistir a elevados esforços de flexão ou cisalhamento, em elementos resistentes à fadiga, em reparos de elementos estruturais existentes, com o intuito de prolongar sua vida útil de serviço e também em estruturas sujeitas a gradientes térmicos.

O ECC pode ser utilizado em vigas de acoplamento para absorver energia sob carregamento sísmico, uma vez que possui elevada ductilidade e que sua capacidade de deformação é compatível com a do aço, funcionando como elemento de amortecimento (Figura 21). Exemplos de prédios com estas vigas tem-se o Glorio-Tower com 27 andares em Tóquio, o Nabule Yokohama Tower com 41 andares em Yokohama e a Torre Kitahama com 60 andares em Osaka, que não sofreram nenhum dano após o terremoto de Tohoku, em 2011. Outra aplicação voltada para carregamento sísmico é seu uso como amortecedor em *retrofit* de paredes não estruturais, conforme é ilustrado na Figura 22, uma vez que são capazes de suportar elevadas cargas verticais e de cisalhamento, absorvendo energia e limitando o dano e o deslocamento da estrutura (KANDA *et al.*, 2011, FUKUYAMA e SUWADA, 2003).



Figura 21 – Vigas de acoplamento localizadas no topo das aberturas ao poço do elevador (Fonte: Li, 2019).

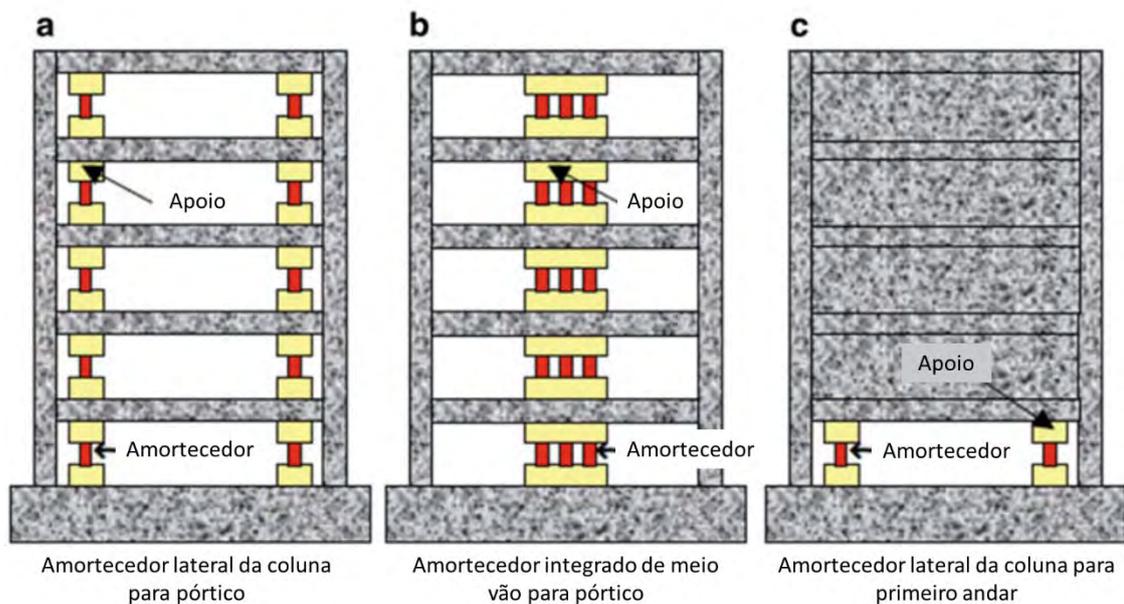


Figura 22 – Configurações de amortecedores em ECC para *retrofit* de edifícios (Fonte: Fukuyama e Suwada, 2003).

O ECC tem sido aplicado em painéis pré-moldados de paredes e lajes, possibilitando uma menor camada de material e conseqüentemente, menor peso da estrutura (FISCHER, 2010). Outras aplicações em paredes são para isolamento externo e para reabilitação de paredes. Como isolante externo, são utilizados painéis de ECC ancorados na parede da estrutura, pois garantem uma maior durabilidade das

fachadas uma vez que possuem maior resistência à fissuração por retração por secagem, quando expostos a variações de temperatura. Estes painéis têm sido muito utilizados na China (ZHANG, 2014). Para o *retrofit* de paredes externas, é aplicada uma fina camada de 5 a 10 mm cobrindo a superfície do edifício de forma a evitar o deslocamento do revestimento da fachada devido a corrosão do aço conforme é ilustrado na Figura 23 (LEUNG *et al.*, 2010; CHEUNG *et al.*, 2004).

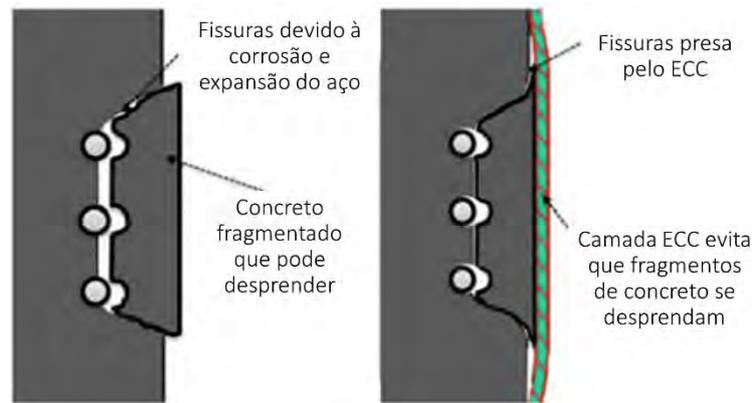


Figura 23 – Uso de camada de ECC para retardar a formação de lascas e seu deslocamento (Fonte: Adaptado Cheung *et al.*, 2004).

Em pontes, o ECC pode ser utilizado como uma laje de ligação em substituição a junta de dilatação dos tabuleiros e parte das lajes de concreto adjacentes, pois é capaz de acomodar os movimentos de expansão e contração do tabuleiro da ponte através da deformação inelástica do material ECC (Figura 24). Um exemplo desta aplicação é encontrado em uma ponte no sul de Michigan nos EUA, a ponte foi construída em 2005 com uma laje de ligação com 225 mm de espessura, 5,5 m de comprimento no sentido do tráfego e 20,25 m de largura, a qual mantém suas características até hoje, conforme é mostrado na Figura 25 (LEPECH e LI, 2008; LEPECH e LI, 2009a).

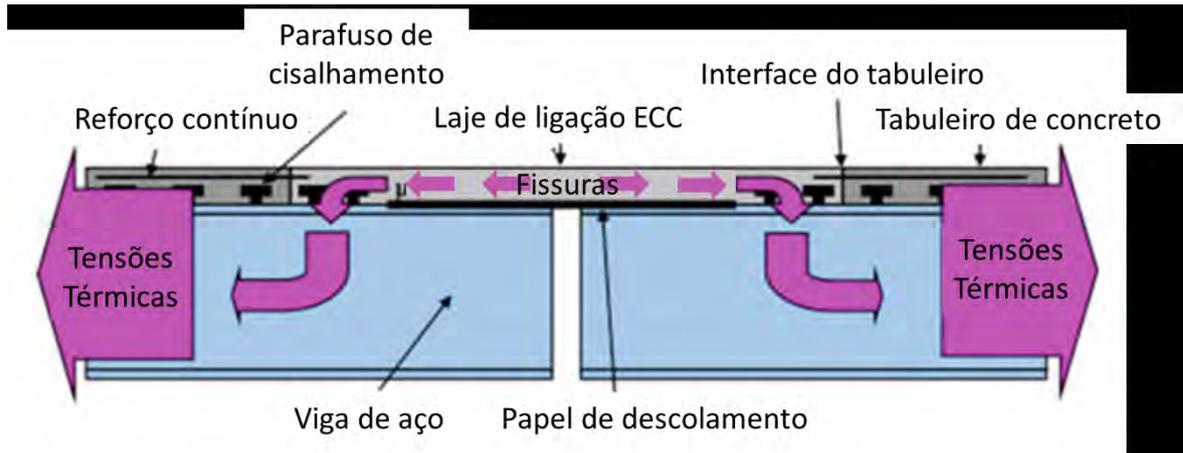


Figura 24 – Desenho esquemático da localização da laje de ligação de ECC no tabuleiro da ponte de concreto e da viga de aço. A maior parte da laje de ECC é deslocada da viga de forma a permitir o deslocamento e a ligação com o tabuleiro é feita por pinos de cisalhamento de aço (Fonte: Li, 2019).

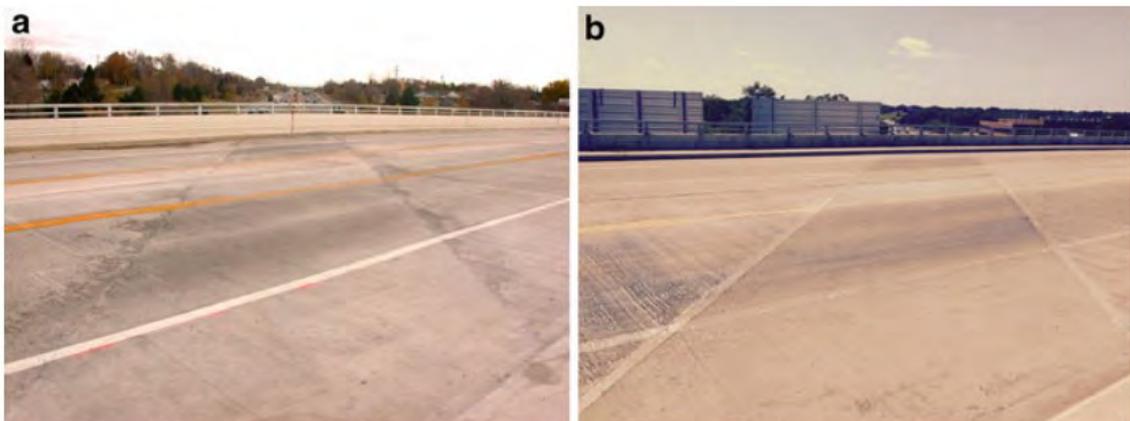


Figura 25 – Estado da laje de ligação ECC (a) imediatamente após a construção e abertura ao tráfego em 2005 e (b) em 2015. Além da leve abrasão na superfície da laje de ligação, a condição permaneceu praticamente o mesmo após 10 anos de uso (Fonte: Li, 2019).

Em 2004/2005, o ECC foi utilizado para a construção de um tabuleiro da ponte estaiada Mihara no Japão, com 972 m de comprimento e 340 m de vão. Foi adotada uma camada de ECC com 38 mm de espessura, com um volume total de 800m³. O ECC permitiu reduzir o peso próprio da estrutura em 40% e a não utilização de juntas de dilatação (ROKUGO e KANDA, 2013; HIROSHI *et al.*, 2005). Detalhes da construção da ponte são apresentados na Figura 26.

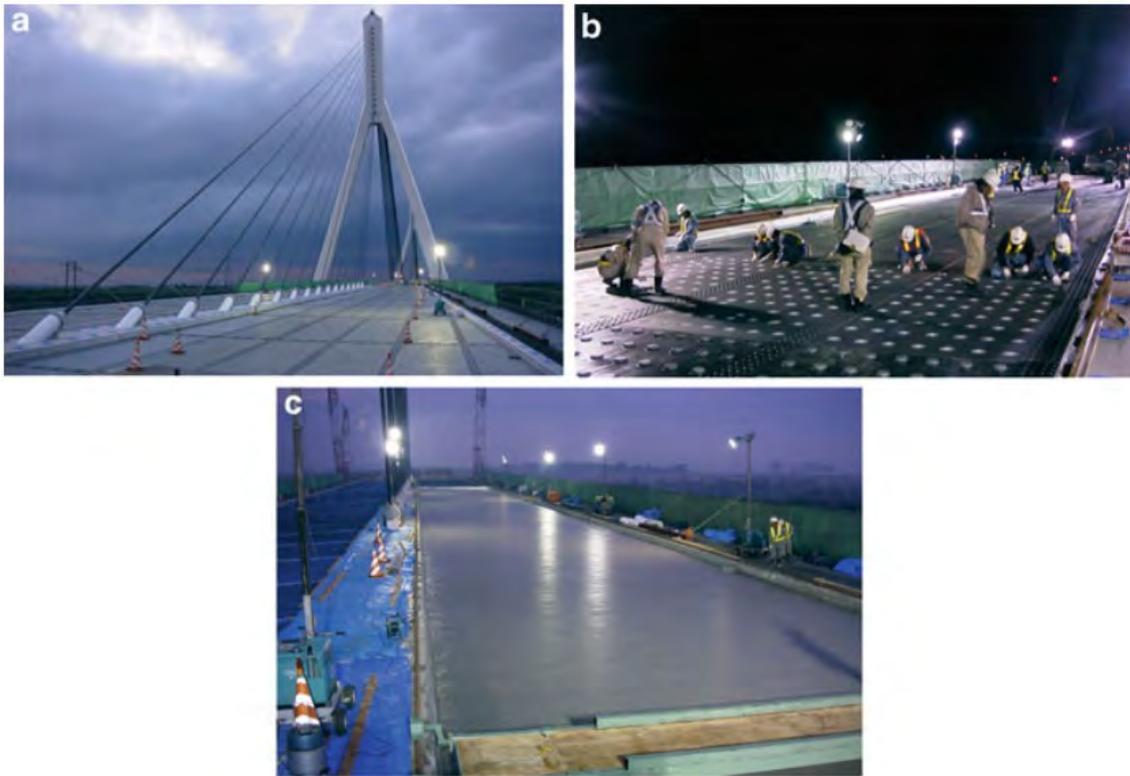


Figura 26 – Construção da Ponte Mihara mostrando (a) a tabuleiro inferior de aço, (b) acoplador de cisalhamento instalado acima de uma membrana polimérica de vedação, e (c) após a aplicação do ECC (Fonte: Li, 2019).

O ECC tem sido muito utilizado no Japão para o reparo de túneis, como no túnel Ten-nou JR, que após um terremoto em 2004, o concreto existente nas paredes do túnel apresentou fissuras e lascamento. Para o reparo da estrutura, foi aplicada uma camada de revestimento de 50 a 70 mm de ECC pulverizado, conforme é ilustrado na Figura 27, numa extensão de 37m, totalizando 25m³ de ECC. O revestimento de ECC foi projetado para resistir à permeação de água, fissuração, carbonatação e ciclos de congelamento e degelo (ROKUGO e KANDA, 2013; ROKUGO, 2018).

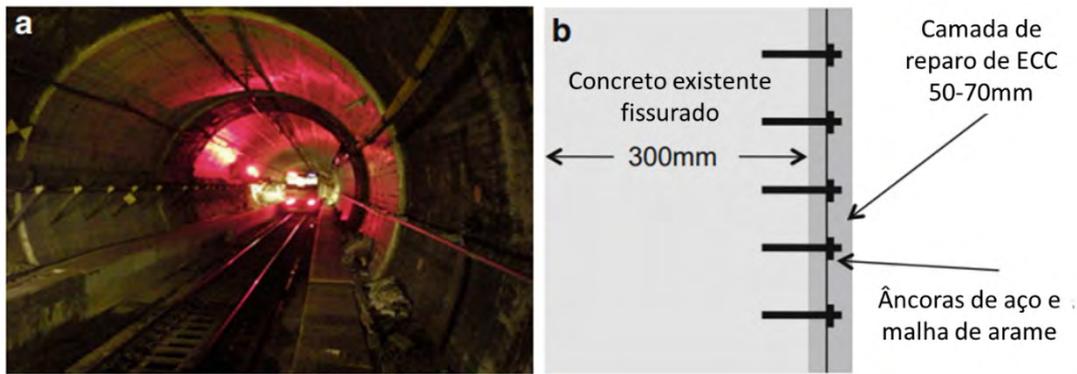


Figura 27 – (a) Túnel Ten-nou JR e (b) detalhes do revestimento de ECC (Fonte: Adaptado Rokugo e Kanda, 2013).

O ECC também pode ser aplicados em reparos e reforço de barragens como é o caso da Barragem Mitaka no Japão (Figura 28). Esta barragem foi construída em concreto e tem como finalidade o abastecimento de água. Em 2003, foi observado que a superfície de concreto do talude de montante apresentava uma severa abrasão e dada a preocupação com fissuras e a estanqueidade da barragem, foi realizado um reforço da estrutura, com a elevação da crista de barragem de 33 m para 44m e a proteção do talude de montante com uma camada de ECC com espessura de 30 mm conforme é ilustrado na Figura 29 (ROKUGO *et al.*, 2009).



Figura 28 – (a) Barragem de Mitaka, (b) abrasão no talude de montante (c) aplicação de ECC por pulverização e (d) barragem após reparo. (Fonte Li, 2019).

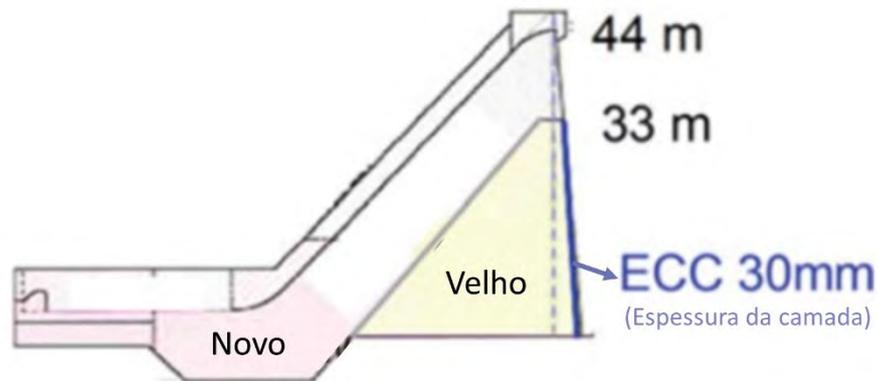


Figura 29 – Representação esquemática do reforço realizado na barragem (Fonte: Adaptado Li, 2019).

Em relação ao custo, de forma geral, o custo do ECC é semelhante ao custo de outros compósito cimentícios reforçados com fibras e argamassas de reparo, todavia, é superior ao de argamassas e de concreto convencional. No entanto, quando é avaliado o ciclo de vida com a aplicação do ECC, há uma redução na manutenção de longo prazo, desta forma, seu custo inicial se torna inferior ao do concreto, somado com os reparos (MATSUMOTO, 2007). No caso de sismos, a eliminação de dispositivos anti-sísmicos torna o custo inicial do ECC inferior. E as aplicações de painéis de ECC são economicamente viáveis já que os painéis finos reduzem a necessidade de reforço de aço, e conseqüentemente, o peso próprio da estrutura (LI, 2019).

1.4.4 Sustentabilidade do ECC

A indústria da construção civil é responsável por grande extração de materiais primas da natureza, consumindo cerca de 60% das matérias-primas extraídas da litosfera, que corresponde a um valor de 4 bilhões de toneladas de matéria-prima por ano (LEHNE *et al.*, 2018, HUANG *et al.*, 2018). Além disso, esse setor foi responsável por 39% das emissões de dióxido de carbono (CO₂) em 2018, das quais 7% resultaram da fabricação do cimento Portland (IEA, 2019).

A produção de cimento é uma das principais poluidoras do meio ambiente, nesta etapa ocorre a emissão de gases poluentes como o gás carbônico tanto nos

fornos rotativos (cliquerização) quanto para gerar energia para os fornos. Para a produção de cada tonelada de cimento Portland são liberados cerca de 700 kg de CO₂ para a atmosfera (VISEDIO e PECCHIO, 2019). Além disso, é necessário a extração da matéria prima como calcário e argila para a fabricação do cimento. De acordo com o PIR (2019), a extração de areia, cascalho e argila cresceu de 9 bilhões de toneladas em 1970 para 44 bilhões de toneladas em 2017, em todo o mundo. Todos estes itens geram impactos negativos ao meio ambiente (CEZAR, 2021).

Dessa forma, além do ECC convencional ser um material caro, ele tem alto consumo de energia e emissão de carbono devido ao elevado consumo de cimento, à falta de agregado graúdo e a quantidade reduzida de agregado fino. Para reduzir o impacto ambiental e melhorar as propriedades do ECC são adotadas substituições parciais do cimento e/ou agregados finos por materiais cimentícios suplementares, como a cinza volante, ou outros ligantes cimentícios de baixo carbono, e fíler (CHETHAN *et al.*, 2015a; BAHRAQ *et al.*, 2020; SYDOR *et al.*, 2021; STECHSHYN *et al.*; 2015).

O uso de adições minerais fornece um material mais sustentável uma vez que são usados resíduos industriais que seriam descartados no meio ambiente. As adições proporcionam incremento nas propriedades mecânicas do concreto como resistência a compressão e módulo de elasticidade quando utilizadas até os teores ótimos de cada adição. Além disso também são benéficas para a durabilidade do concreto, reduzindo o ingresso de agentes agressivos (SHANMUGASUNDARAM *et al.*, 2021b).

As adições minerais podem ter características pozolânicas, cimentantes ou fíler. Os materiais cimentantes possuem características cimentícias hidráulicas, reagindo direto com a água. Já os materiais pozolânicos, não reagem diretamente com a água, é necessário que haja a presença o hidróxido de cálcio (proveniente da hidratação do cimento) para que a reação de hidratação da pozolana ocorra, por este motivo, a reação pozolânica é mais lenta que a reação de hidratação do cimento. E o fíler é inerte, proporcionando a densificação da matriz cimentícia (MEHTA e MONTEIRO, 2014).

Uma das adições minerais mais utilizadas no ECC é a cinza volante, que é proveniente da queima do carvão mineral das termoelétricas, e possui atividade pozolânica. Duas pesquisas aprofundadas sobre a influência da finura da cinza

volante brasileira em materiais cimentícios foram desenvolvidas por Cezar (2021) e Magalhães *et al.* (2023).

Outro ponto a se destacar em termos de sustentabilidade é o uso de areia de sílica fina convencional e fibras sintéticas, pois estas aumentam a intensidades de energia e carbono do material (e custo) quando comparadas ao concreto convencional, conforme é ilustrado na Figura 30 (LEPECH, 2006).

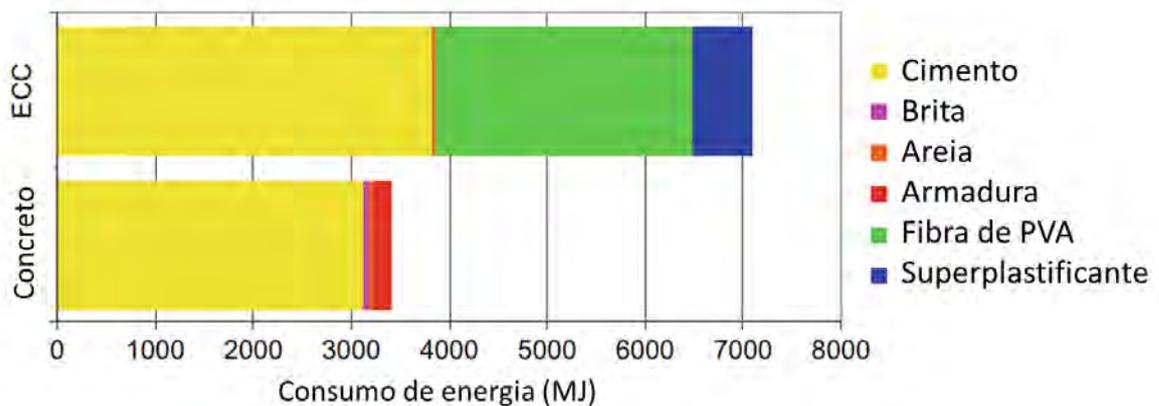


Figura 30 – Consumo de energia por 1000 kg de concreto armado e de ECC (Fonte: Adaptado Lepech, 2006).

No entanto, é possível substituir os materiais com elevado impacto tais como cimento, areia de sílica e fibra sintética de forma parcial ou total por resíduos industriais ou materiais com menor intensidade energética/carbônica (SHOJI *et al.*, 2022). O uso de materiais alternativos para a produção do ECC proporciona menor intensidade de energia e de emissão de carbono conforme é ilustrado na Figura 31. Como materiais alternativos para a produção do ECC, Li (2019) propôs os materiais da Tabela 8.

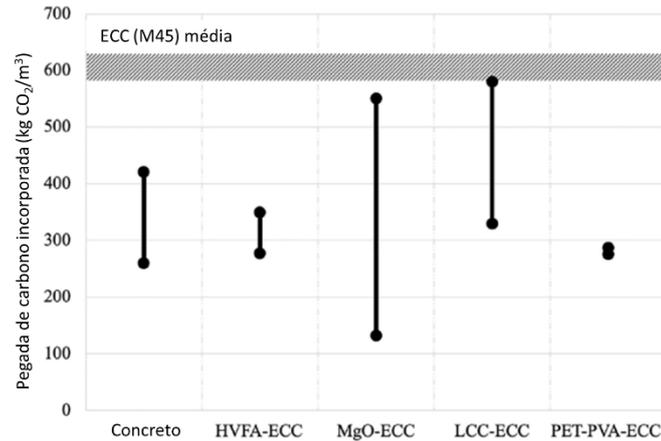


Figura 31 – Emissão de carbono incorporada para concreto convencional e diversos tipos de ECCs (Fonte: Adaptado Shoji *et al.*, 2022).

Nota: HVFA - alto volume de cinzas volantes e LCC - elevado teor de argila calcinada.

Tabela 8 – Materiais alternativos para produção do ECC mais sustentável (Fonte: Li, 2019).

Materiais do ECC	Substituição apropriada	Exemplo
Material cimentício/fíler	Cimento Portland + SCMs	Alto Volume de cinza volante, escória de alto forno
	Cimento Portland + fíler	Rejeito de minério de ferro
	Cimento Portland – ligante alternativo	Geopolímero
Areia	Industrializado	Pó de calcário
	Resíduo	Areia de calcinador de fundição, areia verde de fundição e rejeito de minério de ferro
Fibra	Industrializado	Fibra de polipropileno de alta tenacidade, fibra de PET
	Renovável	Fibra vegetal

A pegada de carbono é um indicador utilizado para medição do total de emissões de gases do efeito estufa incorporado em um determinado material. Uma comparação da pegada de carbono das adições minerais em relação ao cimento é apresentada na Figura 32. É possível observar que a cinza volante possui uma das

melhores pegadas de carbono, todavia, há uma expectativa de sua escassez a longo prazo, devido ao uso de energias mais sustentáveis que a queima do carvão mineral.

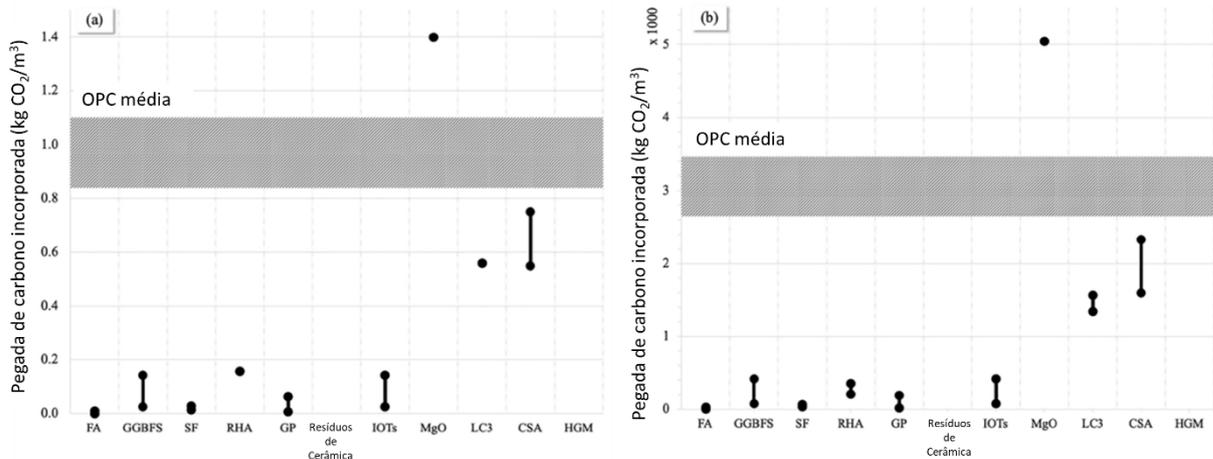


Figura 32 – Pegada de carbono de incorporada de materiais cimentícios verdes (a) por unidade de massa e (b) por unidade de volume (Fonte: Shoji *et al.*, 2022).

Nota: OPC – Cimento Portland comum, FA – cinza volante, GGBFS – escória de alto forno, SF- sílica ativa, RHA – cinza da casca de areia, GP – pozolanas de vidro, IOTs – rejeito do minério de ferro, LC3 - cimento com argila calcinada, CSA - Cimento de sulfoaluminato de cálcio e HGM – microesferas ocas de vidro.

Apesar do ECC englobar o uso de resíduos industriais com adições minerais, o elevado teor de cimento ainda torna o material menos sustentável do que o concreto convencional (HEEDE *et al.*, 2018). A grande vantagem do uso do ECC está na sua durabilidade sob uma variedade de condições de exposição quando comparado ao concreto convencional, o que reduz o número de reparos e manutenções na fase de utilização da estrutura, assim como os custos econômicos e ambientais associados (HEEDE *et al.*, 2018). Dessa forma, uma vez que a vida útil das estruturas é fortemente governada por fissuras, a abertura de fissuras do ECC abaixo de 100 µm minimiza os impactos dos mecanismos de deterioração por agentes agressivos (WEIMANN e LI, 2003).

1.5 Utilização de resíduos da extração do ferro em compósitos cimentícios

Ao longo da revisão bibliográfica realizada pela autora, não foram encontradas aplicações de estéril na fabricação do ECC. No entanto, há registros do uso de rejeito de minério de ferro para a produção do ECC como fíler ou areia (HUANG *et al.*, 2013a; HUANG *et al.*, 2013b).

Segundo Huang *et al.* (2013b), como fíler, o rejeito pode ser utilizado em substituição parcial de cimento e dado sua natureza inerte, podem ser utilizados para reduzir a tenacidade da matriz que resulta na melhoria da ductilidade à tração do compósito e na redução da resistência à compressão do ECC, o que pode ser compensado pela substituição das cinzas volantes por um resíduo mais reativo, como escória granulada de alto forno. Portanto, seu uso como fíler, permite a produção de um ECC com teor de cimento 117,2–350,2 kg/m³, que está próximo ou abaixo do utilizado no concreto convencional. Além disso, a substituição do cimento por rejeito pode resultar numa redução de 10-32% no consumo de energia e de 29-63% de emissões de dióxido de carbono no ECC verde em comparação com o ECC típico.

Como agregado, o rejeito de minério de ferro pode ser utilizado em substituição como areia, reduzindo o consumo de areia de sílica. Para isso, o tamanho das partículas dos agregados deve estar em uma faixa que suporte as propriedades frescas desejáveis do ECC, incluindo boa dispersão de fibra (LI, 2019). Huang *et al.* (2013a) utilizaram uma distribuição granulométrica próxima à da areia convencional, com grãos com formato angular. E foi verificado que o rejeito reduziu a reação álcali-agregado a um risco insignificante. Todavia, a viscosidade da matriz de ECC foi influenciada pelo tamanho do rejeito, tornando a matriz quase não fluida, o que foi corrigido ajustando a quantidade de superplastificante. A dispersão da fibra foi menos uniforme e a tenacidade à fratura aumentou com o aumento no tamanho das partículas de rejeito, de 425 µm para 1180 µm, e a capacidade de deformação a tração reduziu. Por fim, a capacidade de deformação a tração do ECC pode ser melhorada com altos teores de cinza volante (cinza/cimento =4,4) mas ocorre uma redução na resistência à compressão do ECC, sendo inferior a 30 MPa.

2 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL

O programa experimental utilizado neste trabalho foi desenvolvido com o objetivo de estudar o estéril de mineração, para fins de utilização na fabricação de argamassas e compósitos cimentícios reforçados com fibras de PVA. Quatro misturas de argamassas e quatro misturas de compósitos foram fabricadas com diferentes teores de cimento Portland sendo substituído pelo estéril de mineração. O estéril de mineração foi beneficiado por peneiramento, na peneira de 75 μm , antes de ser utilizado nas misturas cimentícias. Além do estéril beneficiado e o cimento Portland, também foram utilizados a areia, água, superplastificante e fibras de PVA na fabricação das misturas de argamassas e compósitos.

Assim, o programa experimental foi dividido em quatro etapas: (1) apresentação dos materiais utilizados na pesquisa e a metodologia dos testes realizados nos materiais e nas misturas de argamassas e compósitos, (2) apresentação das propriedades físico-química, mineralógica, morfológica e térmica do estéril bruto, beneficiado e cimento, (3) desenvolvimento de argamassas com o uso de estéril de mineração e (4) desenvolvimento de compósitos cimentícios do tipo ECC com o uso do estéril de mineração.

Os ensaios no estéril de minério de ferro foram divididos em duas partes, a primeira refere-se ao estéril bruto (*in natura*) sem nenhum tratamento, e a segunda, o estéril beneficiado, que corresponde ao estéril peneirado na peneira de 0,075mm, de forma a ser utilizado como material suplementar na fabricação de argamassas e compósitos do tipo ECC. Na Figura 33 é apresentado um quadro esquemático dos ensaios de caracterização realizados no estéril e no cimento.

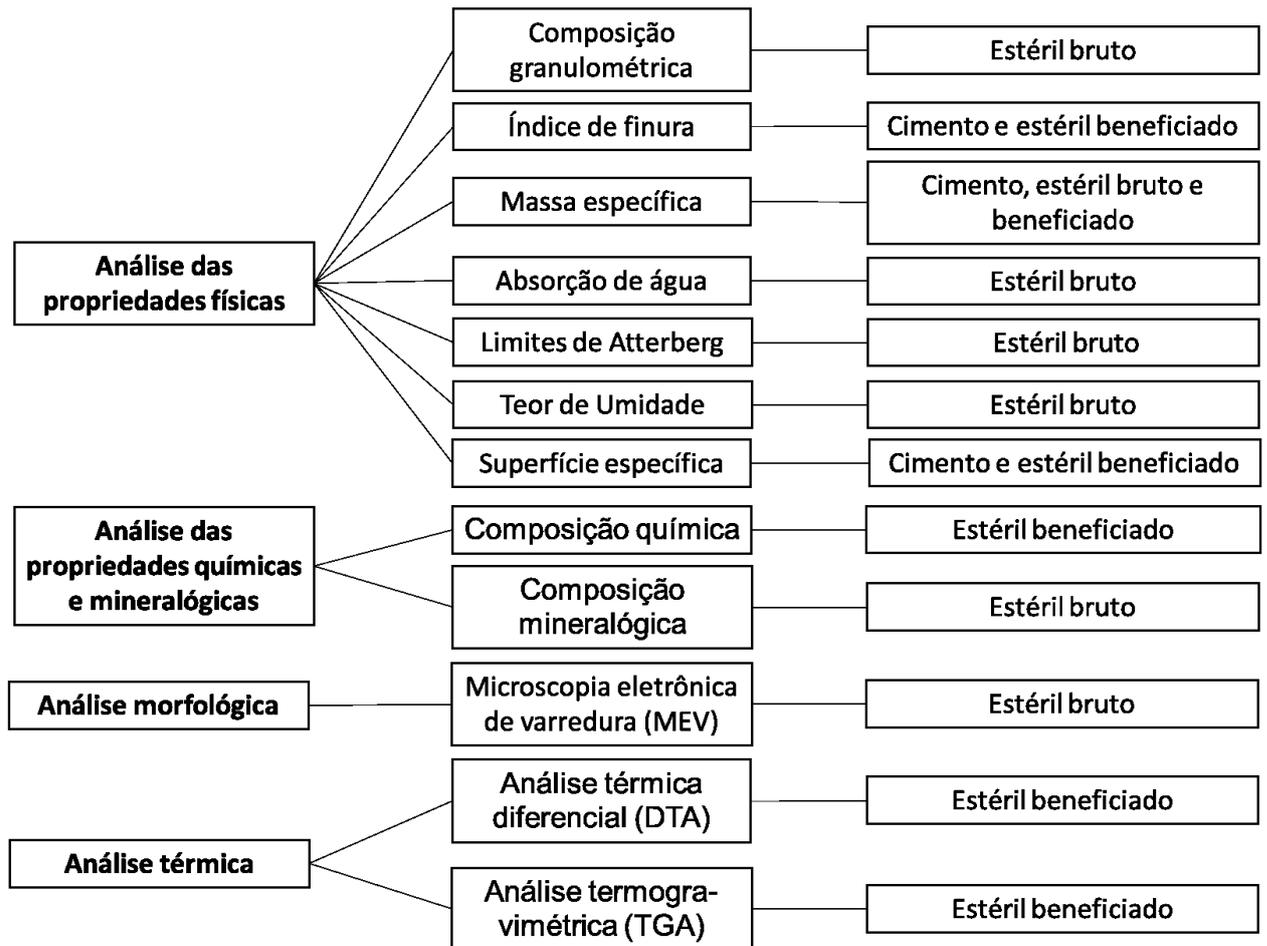


Figura 33 – Fluxograma dos ensaios de caracterização para análise tecnológica do estéril e cimento (Fonte: A autora, 2024).

Os ensaios nas diferentes misturas de argamassa e de ECC foram executados no laboratório de Engenharia Civil da Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ) no Campus Fonseca Teles, e visaram avaliar a influência do estéril nas propriedades no estado fresco e endurecido das argamassas e compósitos do tipo ECC. Na Figura 34 é ilustrada a relação de ensaios realizados.

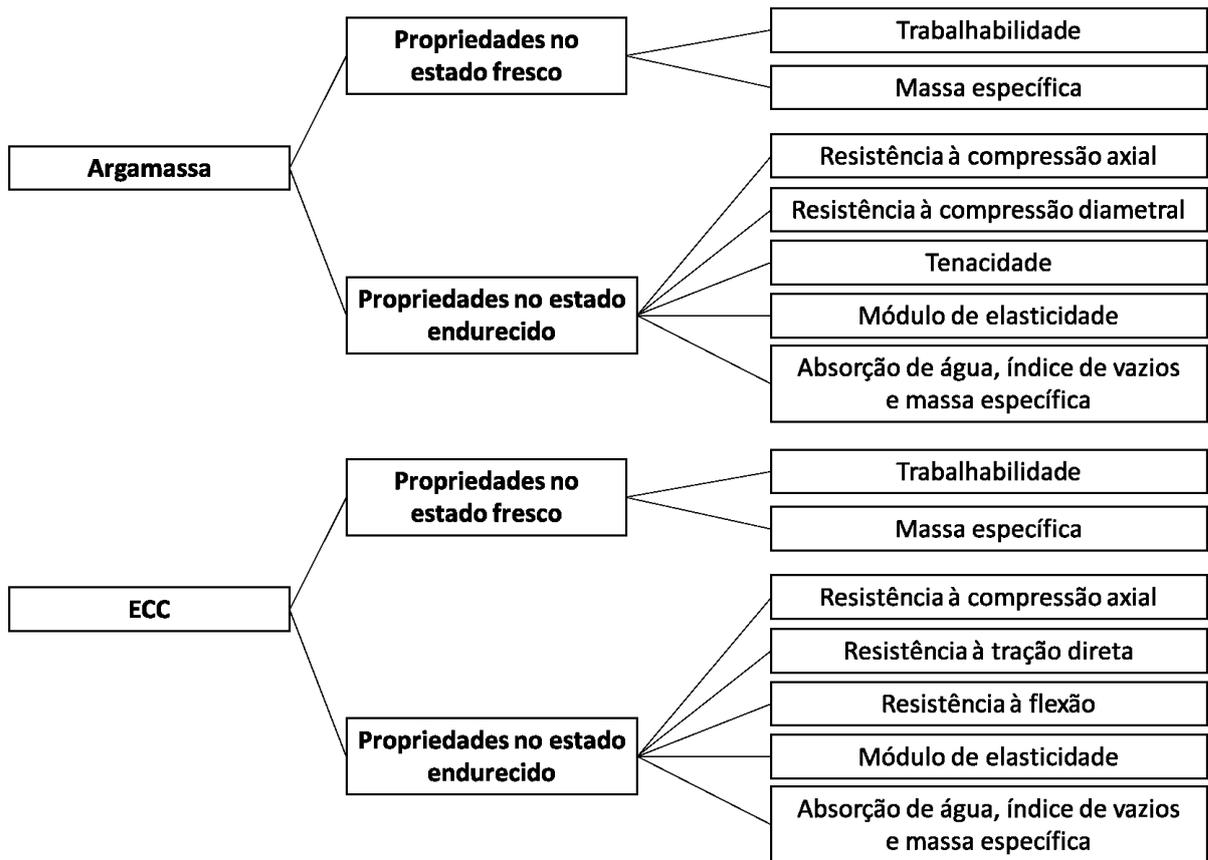


Figura 34 – Ensaio realizados nos corpos de prova de argamassa e ECC (Fonte: A autora, 2024).

Na segunda etapa são descritas as propriedades dos materiais utilizados no presente trabalho. A maior parte das investigações realizadas concentrou-se no resíduo de estéril de mineração, uma vez que este material foi pouco estudado para a aplicação na construção civil, na sequência, ele é comparado ao cimento que foi utilizado nos experimentos.

A terceira etapa apresenta o desenvolvimento de argamassas com o uso do estéril beneficiado em substituição parcial do cimento. No capítulo é apresentada a metodologia de produção dos corpos de prova de argamassa, bem como os resultados dos ensaios realizados nas argamassas. A aplicação do estéril em argamassa foi necessária em virtude da lacuna bibliográfica encontrada sobre este resíduo em materiais cimentícios. Muitas pesquisas foram realizadas com o rejeito de mineração, todavia, o estéril corresponde a maior fração da geração de resíduos durante a extração do minério de ferro, sendo de suma importância o desenvolvimento de pesquisas para uma destinação mais sustentável. O estéril foi utilizado, na forma

de adição mineral, para a produção de argamassas substituindo o cimento em teores de 10%, 20% e 30%.

A quarta e última etapa mostra a produção dos corpos de prova de compósitos e os resultados da aplicação do estéril como adição mineral no ECC. Esta etapa visa investigar a influência do estéril de minério de ferro no desempenho físico e mecânico do ECC. A presente pesquisa é considerada inovadora por não ter sido encontrado registros na literatura da aplicação do estéril na produção de compósitos de elevada capacidade de deformação, tal como o ECC. O estéril foi utilizado na forma de adição mineral, para a produção do ECC, substituindo o cimento em teores de 20% e 30%.

A descrição detalhada de cada etapa é apresentada nos capítulos a seguir.

3 MATERIAIS UTILIZADOS NA PESQUISA E MÉTODOS DE ENSAIOS

3.1 Materiais

3.1.1 Estéril de minério de ferro bruto

O estéril de minério de ferro utilizado no presente estudo foi fornecido pela empresa Vale S.A, totalizando uma amostra de 120 kg. O material foi coletado na pilha de disposição de estéril (PDE) Canga Leste, sendo proveniente da Mina de Conceição, localizada no Complexo Minerador de Itabira, na região do Quadrilátero Ferrífero, no estado de Minas Gerais, Brasil (Figura 35). Na Figura 36 é apresentada a localização do Complexo Minerador de Itabira com destaque para o ponto em que foi coletada o estéril para o presente estudo. O estéril foi extraído por detonação da Cava Conceição e foi levado diretamente para o local de descarte (Figura 37), onde foi recolhido, não havendo um armazenamento prévio, antes de sua disposição final. Um ponto importante a mencionar é que todo o material coletado pertence a mesma frente de lavra.

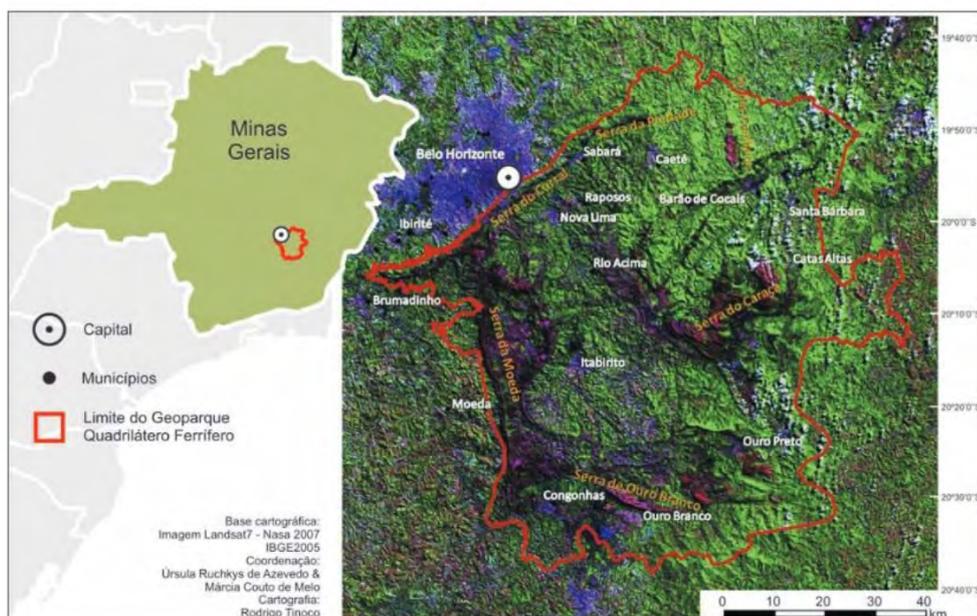


Figura 35 – Localização do Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais (Fonte: Almada, 2021).



Figura 36 – Complexo Minerador de Itabira com destaque para o ponto que a amostra de estéril foi coletada (Fonte: Google Earth, Foto de 13/09/2023. Acessado em 15/10/2023).



Figura 37 – Ponto de coleta da amostra de estéril para o presente estudo (Fonte: A autora, 2024).

3.1.2 Estéril beneficiado

De forma a ser utilizado como substituto parcial do cimento, o estéril de mineração bruto, apresentado no Item 3.1.1, sofreu um processo de beneficiamento por peneiramento, em que foram selecionadas as partículas com diâmetro dos grãos de até 75 μm . Desta forma, o estéril recebeu a nomenclatura de estéril beneficiado.

3.1.3 Cimento

O cimento utilizado na pesquisa foi o cimento CP V-ARI, por ser um cimento com baixo teor de adição mineral, de forma a avaliar a influência do estéril nas propriedades de argamassas e compósitos. De acordo com a NBR 16697 (2018), o CP V-ARI possui de 90 a 100% de clínquer e sulfato de cálcio (gesso) e de 0 a 10% de material carbonático.

3.1.4 Agregado miúdo

A areia utilizada para fabricação das argamassas e dos ECCs foi uma areia fina, a qual foi peneirada de forma a obter o diâmetro máximo dos grãos de 300 μm . A curva granulométrica da areia é ilustrada na Figura 38. A massa específica da areia foi determinada por Silva (2023), com base na NBR 16916 (2021). Seu valor é igual a 2,64 g/cm^3 .

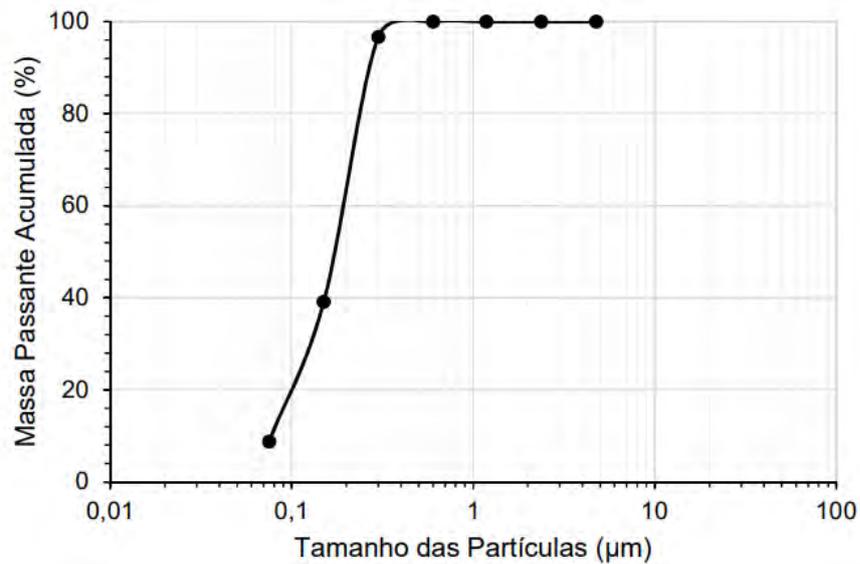


Figura 38 – Curva granulométrica do agregado miúdo (Fonte: Silva, 2023).

3.1.5 Fibras

As fibras utilizadas no presente estudo para fabricação do ECC foram as fibras de álcool polivinílico (PVA) com 8 mm de comprimento, fabricadas pela empresa japonesa Kuraray Co. As propriedades da fibra fornecidas pelo fabricante estão na Tabela 9.

Tabela 9 – Propriedades da fibra de PVA (Fonte: dados do fabricante Kuraray).

Propriedade	Especificação
Comprimento (mm)	8
Diâmetro (μm)	40
Razão de aspecto	200
Massa específica (g/cm ³)	1,31
Módulo de elasticidade (GPa)	39,9
Resistência à tração (MPa)	1576,2
Alongamento (%)	6,5

3.1.6 Superplastificante

Para a fabricação dos compósitos cimentícios foi utilizado o superplastificante Glenium 51 da marca BASF com o objetivo de melhorar a trabalhabilidade da mistura dada a quantidade reduzida de água. O superplastificante adotado consiste em um aditivo de terceira geração com base química de éter policarboxílico. Suas principais características são listadas na Tabela 10.

Tabela 10 – Características do superplastificante Glenium 51 (Fonte: dados do fabricante BASF).

Característica	Especificação
Aparência	Líquido branco turvo
pH	5-7
Densidade	1,067-1,107 g/cm ³
Sólidos	28,5-31,5 %
Viscosidade	<150

3.1.7 Água

A água utilizada para a produção dos corpos de prova de argamassa e dos ECCs é proveniente do sistema de abastecimento da cidade do Rio de Janeiro a qual abastece as instalações hidráulicas do Laboratório de Engenharia Civil da Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ) no campus do Fonseca Teles.

3.2 Métodos de Ensaio

3.2.1 Homogeneização e quarteamento do estéril

Tendo em vista a heterogeneidade do estéril coletado, foi realizada a homogeneização do material e, posteriormente, o quarteamento para separação das amostras de estéril de forma representativa, para realização dos ensaios de

caracterização do estéril bruto. A homogeneização foi feita com auxílio de uma lona plástica e com um balde, em que o estéril foi disposto de forma contínua ao longo de uma pilha. Em seguida, as partes localizadas nas pontas foram removidas e distribuídas por toda a pilha novamente. Assim, quarteou-se a pilha em diferentes amostras, as quais foram armazenadas para posterior utilização. Estas etapas seguiram os procedimentos da NBR 10007 (2004) e são mostradas na Figura 39.

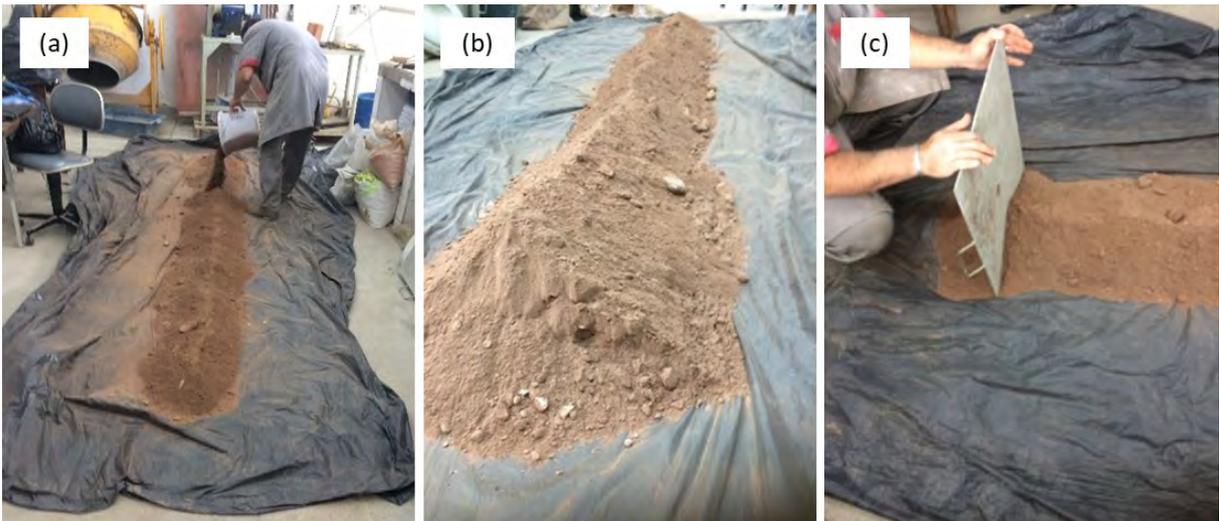


Figura 39 – Homogeneização e quarteamento das amostras de estéril bruto (Fonte: A autora, 2024).

3.2.2 Ensaio no estéril bruto

3.2.2.1 Curva granulométrica

A determinação da composição granulométrica do estéril bruto foi realizada conforme o procedimento estabelecido na NBR17054 (2022). As peneiras adotadas correspondem as peneiras das séries normal e intermediária. Para a realização do ensaio, as peneiras foram previamente limpas e encaixadas com abertura de malha em ordem crescente da base para o topo, de maneira a formar um conjunto único. Em cada peneira foram verificadas as massas retidas e determinados os percentuais retidos e passante acumulados. Na Figura 40 é apresentada uma foto da execução do peneiramento para determinação da curva granulométrica do estéril. Em conjunto

com o ensaio para determinação da granulometria do estéril por peneiramento, foi realizado o ensaio de sedimentação para determinação da granulometria do material passante na peneira 150 μm conforme os procedimentos da NBR 7181 (2016). Esta parte da curva granulométrica foi realizada pelo laboratório de Mecânica dos Solos da UERJ.



Figura 40 – Configuração do ensaio para determinação da curva granulométrica (Fonte: A autora, 2024).

3.2.2.2 Limites de Atterberg: limite de plasticidade (LP) e limite de liquidez (LL)

A determinação dos Limites de Atterberg do estéril bruto foi realizada com base na NBR 7180 (2016) para determinação do limite de plasticidade e na NBR 6459 (2016) para determinação do limite de liquidez. O ensaio de plasticidade consiste na adição de água na amostra de estéril, amassando e revolvendo a continuamente com o auxílio de uma espátula até obter uma pasta homogênea com consistência plástica. A amostra na forma de bola é colocada em uma placa de vidro e rolada com a palma da mão para dar a forma de um cilindro até que a mesma atinja o diâmetro de 3 mm com um comprimento de 100mm, fragmentando-se. Na impossibilidade de obter esse cilindro a amostra é considerada como não apresentando limite de plasticidade (NP).

No ensaio de liquidez, assim como no de plasticidade, é adicionada água na mistura em pequenos incrementos, amassando e revolvendo a continuamente com o

auxílio de uma espátula até obter uma pasta homogênea com consistência necessária para que 35 golpes sejam suficientes para fechar a ranhura. A amostra é transferida para uma concha e é feito uma ranhura na parte central com o auxílio de um cinzel. E a amostra é golpeada em queda livre contra a base da concha, sendo verificado o número de golpes necessários para que as bordas inferiores da ranhura se unam ao longo de 13 mm de comprimento. Na impossibilidade de conseguir a abertura ou o fechamento da ranhura com mais de 25 golpes a amostra é considerada como não apresentando limite de liquidez (NL).

Estes ensaios foram realizados no laboratório de Mecânica dos Solos da UERJ.

3.2.2.3 Massa específica

A densidade real dos grãos (G_s) do estéril bruto foi determinada com base na NBR 6458 (2016). Vale a pena destacar que foi utilizada esta norma pois permite a avaliação da massa específica de toda a fração de estéril bruto, sem necessitar de um processo de beneficiamento por peneiramento do material. O ensaio foi realizado pelo laboratório de mecânica dos solos da UERJ com o auxílio de um picnômetro. Inicialmente, pesou-se a massa seca do estéril e, em seguida, a amostra foi colocada em uma capsula imersa em água. Depois de 12 horas, a amostra foi transferida para o copo de dispersão e foi acrescentada água destilada até cerca de metade do volume do copo com sua dispersão por 15 minutos. Logo depois, a amostra foi transferida para o picnômetro onde foi adicionada água destilada até cerca de metade do volume do picnômetro, e foi aplicado vácuo durante 15 minutos, agitando o picnômetro em intervalos regulares de tempo. Acrescentou-se água destilada até cerca de 1 cm abaixo da base do gargalo e aplicou-se vácuo. Em seguida o picnômetro foi colocado em repouso, até alcançar a temperatura ambiente. Com o auxílio de uma pipeta, adicionou-se água destilada até que a base do menisco coincidissem com a marca de referência e o conjunto foi pesado. Por último, determinou-se a temperatura do conteúdo do picnômetro e obteve-se a curva de calibração correspondente a massa do picnômetro cheio de água até a marca de referência. Desta forma, a densidade real dos grãos foi calculada com base na Equação 2.

$$G_s = \frac{P_s}{(P_s + P_w - P_{ws})}$$

Equação 2

Onde: P_s é o peso do solo seco (em g), P_w é o peso do picnômetro mais água (em g), P_{ws} é o peso do picnômetro mais solo mais água (em g) e $P_s + P_w - P_{ws}$ representa o peso de água deslocada (em g).

3.2.2.4 Teor de umidade

O teor de umidade do estéril bruto foi realizado com base na NBR 16097 (2012) no laboratório de Mecânica dos Solos da UERJ. No ensaio, a amostra de estéril foi destorroada e colocada, no estado fofo, em uma capsula metálica com tampa, e seguida pesou-se a massa do conjunto (M_1). Posteriormente, a tampa foi removida e a capsula foi colocada na estufa durante 24 horas. Em seguida, a capsula foi colocada em um dessecador onde permaneceu até atingir a temperatura ambiente. A tampa foi recolocada e pesou-se o conjunto (M_2). Desta forma, o teor de umidade foi obtido pela Equação 3.

$$w = \frac{M_1 - M_2}{M_2 - M_3} \quad \text{Equação 3}$$

Onde: w é o teor de umidade (em %), M_1 é a massa do solo úmido mais a massa do recipiente (em g), M_2 é a massa do solo seco mais a massa do recipiente (em g) e M_3 é a massa do recipiente (em g).

3.2.2.5 Microscopia eletrônica de varredura (MEV)

A morfologia do estéril bruto foi verificada através da análise de imagens obtidas por microscopia eletrônica de varredura (MEV). Neste ensaio foi utilizado o equipamento TM4000 da marca Hitachi, que é um estereoscópio equipado com um sistema de espectroscopia de energia dispersiva de raios X (EDS) da marca Bruker do tipo model X Flash MIN SVE. O EDS permite verificar a concentração de óxidos em um ponto específico da amostra.

Para a realização do ensaio, uma pequena porção da amostra foi depositada com o auxílio de uma espátula sobre uma fita dupla face de carbono que se encontrava fixada em uma porta amostra de alumínio. As imagens de MEV foram obtidas tanto nos modos de elétrons secundários (SE) quanto de elétrons

retroespalhados (BSE), usando uma tensão de aceleração de 15 kV. O ensaio foi realizado no Laboratório de Caracterização de Materiais do Instituto Federal do Rio de Janeiro (IFRJ).

A análise microscópica também foi realizada na superfície de fratura dos corpos de prova de compósitos após os ensaios de tração direta. A realização deste ensaio é ilustrada na Figura 41.



Figura 41 – Realização das análises MEV nas superfícies de fratura dos corpos de prova de ECC após o ensaio de tração (Fonte: A autora, 2024).

3.2.2.6 Difração de raio-X

A difração de raios-X (DRX) é uma técnica que permite a determinação das fases cristalinas dos materiais. Nesta análise, os dados do ensaio são representados por difratograma, em que a intensidade da radiação difratada é escrita em função do ângulo de difração e da distância interplanar. Os picos presentes no difratograma são comparados com bancos de dados específicos e é avaliado se a amostra é cristalina ou amorfa.

O equipamento empregado foi o difratômetro de raios-X da marca Brunker, com anodo de Cu, 10mA, 30kV, varredura (2θ) de 5° a 90° , tamanho do passo de $0,02^\circ$ e tempo de contagem por passo de 2s. As interpretações do ensaio foram efetuadas por comparação com valores de referência do banco de dados Crystallography Open Database com o software: Match! – Phase Analysis using Powder Diffraction.

3.2.3 Ensaio no estéril beneficiado e no cimento

3.2.3.1 Índice de finura

O índice de finura do estéril beneficiado foi determinado com base na NBR 15894-3 (2010), utilizando a peneira de $45\ \mu\text{m}$ (Figura 42). A finura do estéril foi calculada pela Equação 4.

$$F_{45\mu} = \frac{m_f \cdot c}{m_i} \times 100 \quad \text{Equação 4}$$

Onde: $F_{45\mu}$ é a finura representada pelo teor de resíduo na malha de $45\ \mu\text{m}$ (em %), m_i é a massa inicial da amostra de estéril (em g), m_f é a massa de resíduo na malha de $45\ \mu\text{m}$ após peneiramento via úmida e secagem em estufa (em g) e c o fator de correção da peneira utilizada no ensaio.



Figura 42 – Etapas para determinação do módulo de finura do estéril, sendo (a) separação das amostras, (b) transferência das amostras para solução de hexametáfosfato de sódio, (c) colocação da mistura na peneira, (d) colocação da peneira sob fluxo de água, (e) transferência do material com auxílio de pisseta de água e (f) colocação do material em estufa (Fonte: A autora, 2024).

O índice de finura do cimento foi determinado com base na NBR 11579 (2012), usando a peneira de 45 μm , além da peneira de 75 μm . O peneiramento (Figura 43) seguiu as fases de eliminação de finos, etapa intermediária, peneiramento final e transferência de resíduos, conforme a referida norma. O cálculo do índice de finura foi realizado pela Equação 5.

$$I_F = \frac{r \cdot F_c}{m} \times 100 \quad \text{Equação 5}$$

Onde: I_F é o índice de finura do cimento (em %), r é o resíduo do cimento na peneira 75 μm (em g), m é massa inicial do cimento (em g) e F_c é o fator de correção da peneira utilizada no ensaio.



Figura 43 – Peneiramento para realização do ensaio de índice de finura do cimento (Fonte: A autora, 2024).

3.2.3.2 Superfície específica

O ensaio de área superficial específica (ASE) do estéril beneficiado e cimento foi realizado conforme preconizado na NBR 16372 (2015) no laboratório de Reatores Químicos, Cinética e Catálise (RECAT) da Universidade Federal Fluminense (UFF) e é mostrado na Figura 44. A análise de fisissorção de nitrogênio foi realizada no equipamento ASAP-2020 da marca Micromeritics. Anteriormente a análise, realizou-se etapas de pré-tratamento para a remoção da umidade e outros compostos adsorvidos no catalisador que poderiam levar a erros na medição dos parâmetros desejados.

Primeiro, secou-se a amostra à 120°C na estufa de um dia para o outro e depois realizou-se nova secagem da amostra na estação de pré-tratamento do equipamento. Após atingir 10 mmHg, iniciou-se o vácuo irrestrito e a temperatura foi elevada até 200°C com taxa de 10°C/min.L, mantendo esta temperatura por uma noite e por fim conferido no equipamento que não havia alteração na pressão quando parava o vácuo no porta amostra, então a amostra foi resfriada e retirada para ser colocada na porta de análise. A partir das isotermas de adsorção de N, adquiridas à 77 K, obteve-se a área específica dos suportes e catalisadores pelo cálculo numérico proposto por Brunauer-Emmett-Teller (método BET).

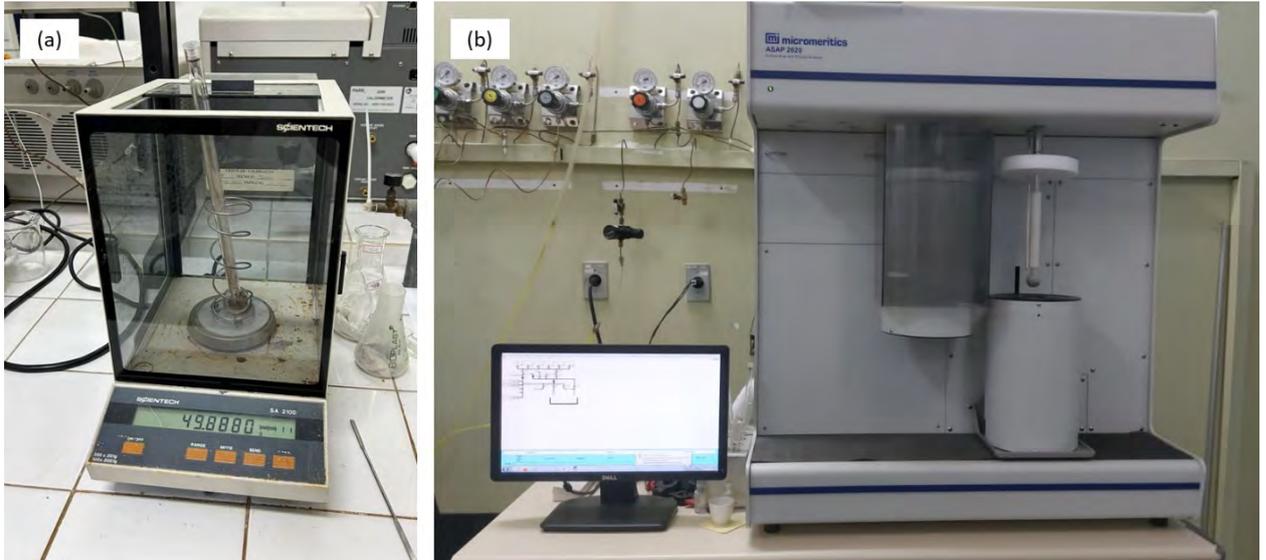


Figura 44 – Ensaio de área de superfície específica (Fonte: A autora, 2024).

3.2.3.3 Massa específica

A massa específica do cimento e estéril beneficiado foi determinada com base na NBR 16605 (2017) e foi obtida por meio do frasco volumétrico de Le Chatelier com o uso de um líquido inerte que não reagisse com o cimento (Figura 45 e Figura 46). A massa específica do cimento foi obtida pela Equação 6.

$$\rho = m/V \quad \text{Equação 6}$$

Onde: ρ é a massa específica do cimento (em g/cm^3), m é a massa do material ensaiado (em g) e V é o volume deslocado pela massa do material ensaiado (em m^3).

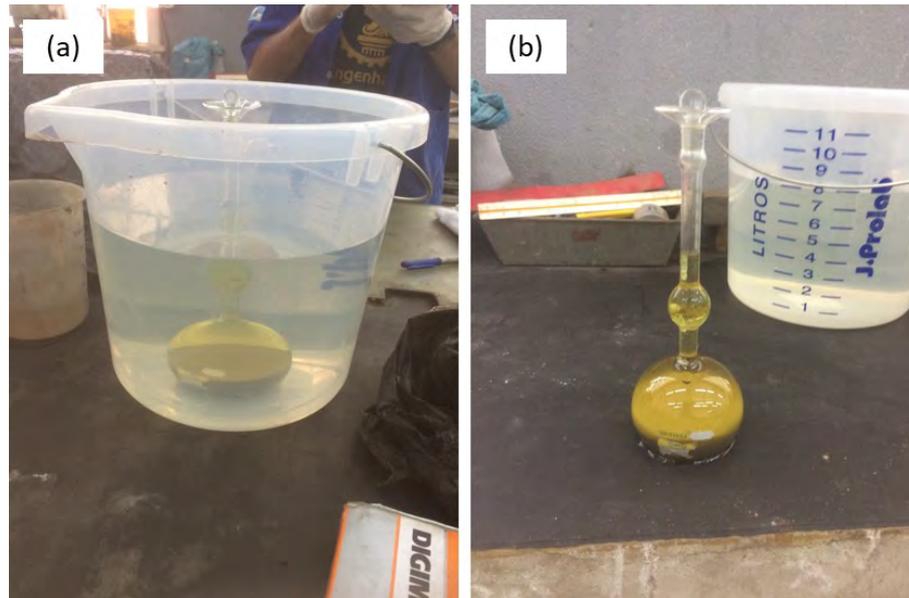


Figura 45 – Ensaio para determinação da massa específica do cimento (Fonte: A autora, 2024).

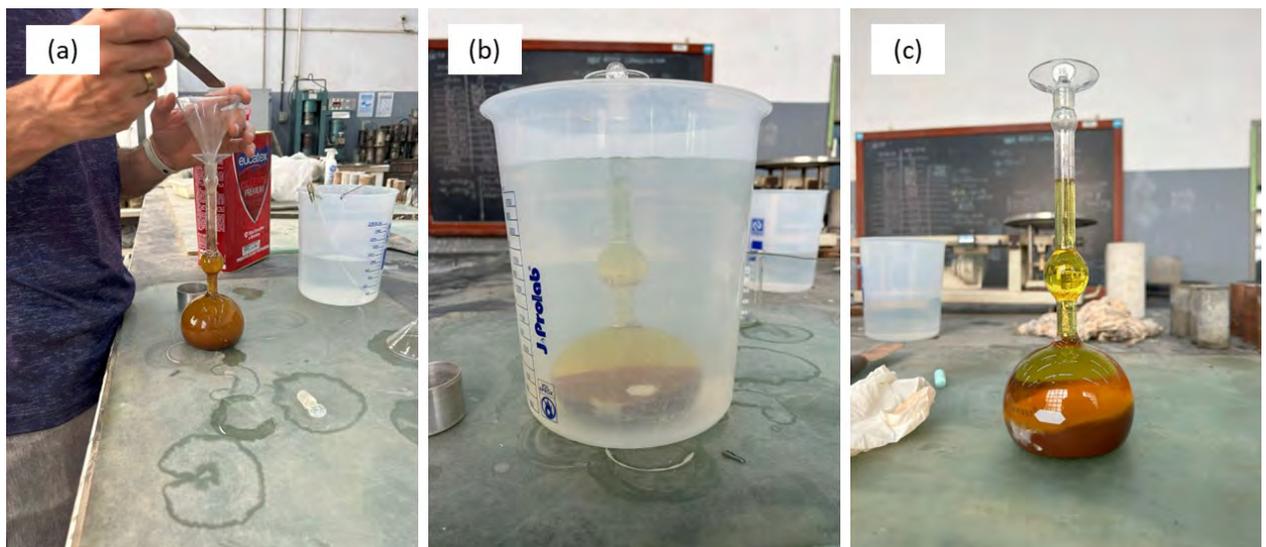


Figura 46 – Ensaio para determinação da massa específica do estéril – NBR 16605 (2017) (Fonte: A autora, 2024).

A absorção de água do estéril beneficiado foi determinada com a norma NBR 16916 (2021). A realização do ensaio é apresentada na Figura 47 e o seu valor foi determinado a partir da Equação 7.

$$Abs = \frac{m_B - m_A}{m_A} \quad \text{Equação 7}$$

Onde: Abs é a absorção de água (em %), m_A é a massa da amostra em estufa (em g) e m_B é a massa da amostra na condição saturada superfície seca (em g).

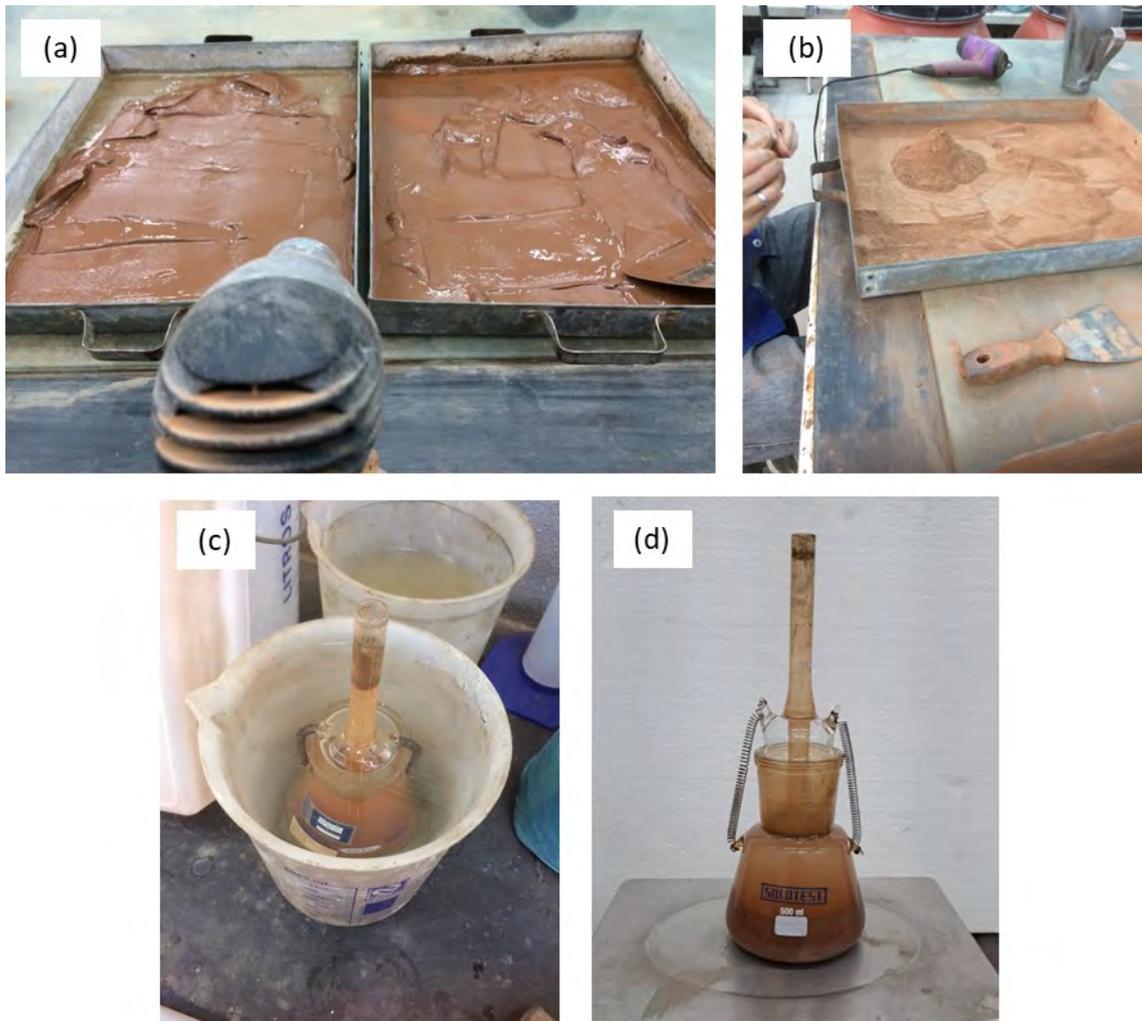


Figura 47 – Etapas para determinação da absorção de água do estéril– NBR 16916 (2021): (a) secagem do estéril, (b) formação do cone de estéril com deslizamento de suas paredes, (c) colocação do picnômetro com estéril imerso em água e (d) pesagem do picnômetros com estéril (Fonte: A autora, 2024).

3.2.3.4 Composição química

A composição química do estéril beneficiado foi obtida pelo ensaio de espectrometria de fluorescência de raio X (XRF). Este ensaio foi realizado pelo Laboratório de Instrumentação Eletrônica e Técnica Analíticas (LIETA) do Departamento de Física Aplicada e Termodinâmica da UERJ.

A análise foi realizada no equipamento XRF *Automated Epsilon 1* da empresa *Malvern Panalytical*. Este equipamento é composto por um tubo de raios X com alvo

de Prata (Ag) e um detector SDD (Silicon Drift Detector) (resolução de energia < 135 eV para Mn-K α) conforme é ilustrado na Figura 48. Para a realização do ensaio não foi necessária a realização de nenhum tipo de preparação prévia da amostra de estéril.

A análise por fluorescência de raios X é um método quali-quantitativo baseado na medida das intensidades (número de raios X detectados por unidade de tempo) dos raios X característicos emitidos pelos elementos que constituem uma amostra (KLOCKENKAMPER e VON BOHLEN, 1996 *apud* LIETA, 2023). De modo resumido, a análise por fluorescência de raios X consiste em três fases: excitação dos elementos que constituem a amostra, dispersão dos raios X característicos emitidos pela amostra e detecção desses raios X (LACHANCE e CLAISSE, 1995; ANJOS *et al.*, 2000 *apud* LIETA, 2023).

As análises da amostra de estéril foram realizadas a partir de duas configurações experimentais. A primeira configuração experimental (baixo Z) privilegia a excitação dos elementos de número atômico $Z \leq 20$, para as linhas K. Nesta configuração experimental foi utilizado uma tensão de 10 kV, corrente de 150 μ A com um tempo de aquisição de 300 s. A segunda configuração experimental (alto Z) privilegia a excitação dos elementos de número atômico $20 < Z < 42$ para as linhas K e $55 < Z < 92$ para as linhas L. Nesta configuração experimental foi utilizado uma tensão de 50 kV, uma corrente de 100 μ A, filtro de Cu (500 μ m) com um tempo de aquisição de 600 s. As concentrações elementares foram calculadas no próprio software do equipamento utilizando os parâmetros fundamentais da fluorescência de raios X.

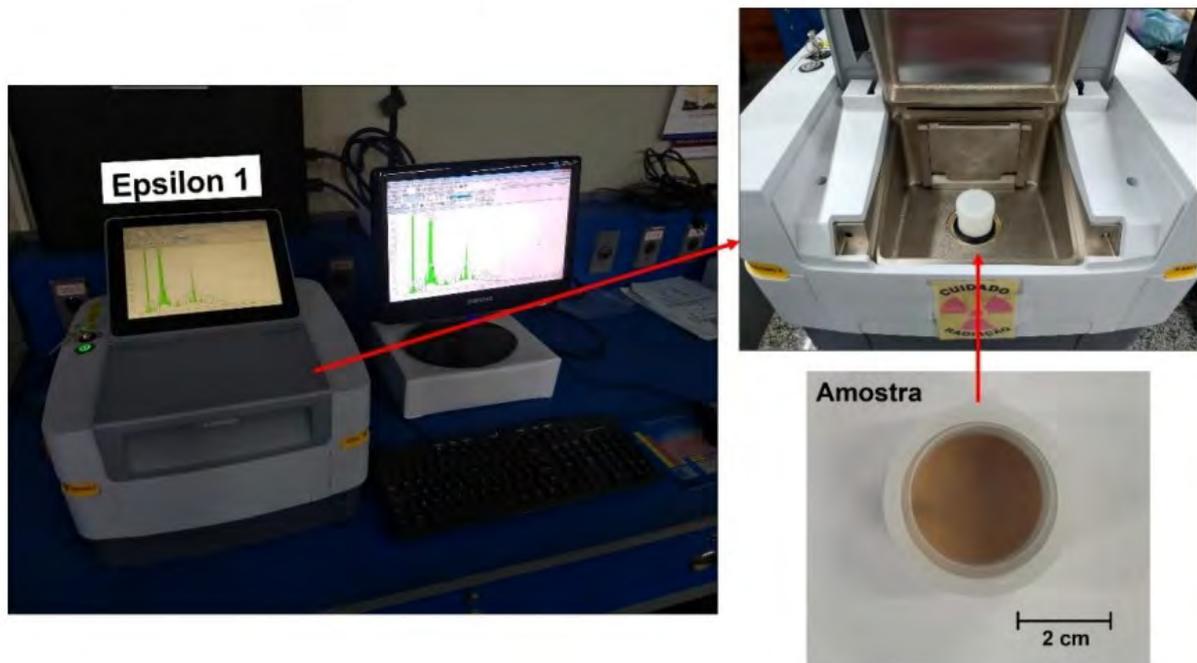


Figura 48 – Configuração do ensaio de fluorescência de Raio-X (Fonte: LIETA, 2023).

3.2.3.5 Perda ao fogo

A perda ao fogo do estéril beneficiado e do cimento será determinado com base na NBR17086-6 (2023). No ensaio foi utilizado 1 g do material, que foi colocado em um cadinho de porcelana e foi calcinado em forno mufla na temperatura de 950°C, por um período de 1 hora. Logo em seguida, o material foi resfriado em um dessecador e pesado. A realização do ensaio é mostrada na Figura 49. A perda ao fogo foi calculada pela Equação 8.

$$\%PF = \frac{m_1 - m_2}{m} \quad \text{Equação 8}$$

Onde: %PF é a perda ao fogo (em %), m é a massa da amostra utilizada no ensaio (em g), m_1 é a massa do cadinho mais a massa da amostra ensaiada (em g) e m_2 é a massa do cadinho mais a massa da amostra, após a calcinação (em g).



Figura 49 – Realização do ensaio de perda ao fogo, sendo (a) colocação das amostras no forno, (b) aquecimento das amostras e (c) pesagem da amostra (Fonte: A autora, 2024).

3.2.3.6 Análise térmica

A análise térmica do estéril beneficiado tem como objetivo a verificação das mudanças físico-químicas de fases das amostras quando submetidas ao aumento de temperatura. O estudo termodinâmico é dividido na análise térmica diferencial (DTA) e na análise termogravimétrica (TGA). A DTA é uma técnica na qual a diferença de temperatura existente em uma amostra e um material de referência são monitorados durante um aquecimento e é utilizada para detectar a temperatura inicial dos processos térmicos e qualitativamente caracterizá-los como endotérmico e exotérmico, através de curvas de deflexões, em sentidos opostos. Já a TGA é a técnica na qual a mudança da massa de uma substância é medida em função da temperatura enquanto esta é submetida a uma programação controlada e é utilizada para determinar a taxa de variação de massa em relação ao tempo.

O ensaio térmico foi realizado no Laboratório de Materiais para Produtos de Construção / Habitação e Edificações do Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT) com o equipamento de análise simultâneas TGA/DTA/DSC, da TA *Instruments*, modelo SDT 2960, com taxa de aquecimento de 10°C/min, até a temperatura de 1000°C. As análises foram realizadas em atmosfera inerte de nitrogênio com fluxo de 50 ml/min e foi utilizado cadinho de alumina sem tampa. A análise foi realizada com base em diretrizes gerais da ASTM E 794 (2006).

3.2.3.7 Índice de atividade pozolânica

3.2.3.7.1 Atividade pozolânica com cal

A atividade pozolânica do estéril com a cal foi verificada em uma argamassa fabricada com cal, estéril beneficiado, areia e água, aos 7 dias de idade, conforme é estabelecido na NBR 5751 (2015). A quantidade de água a ser utilizada foi ajustada com base no índice de consistência previsto na NBR 5751 (2015). A adição de areia, tempo de amassamento, moldagem dos corpos de prova e determinação da carga de ruptura à compressão seguiram as recomendações na NBR 7215 (2019). Na Figura 50 é apresentada uma imagem do processo de produção dos corpos de prova e de sua cura e na Figura 51, a realização do ensaio aos 7 dias. Com esse ensaio foi calculada a resistência à compressão individual, a média da resistência à compressão dos três corpos de prova cilíndricos e o desvio relativo máximo.

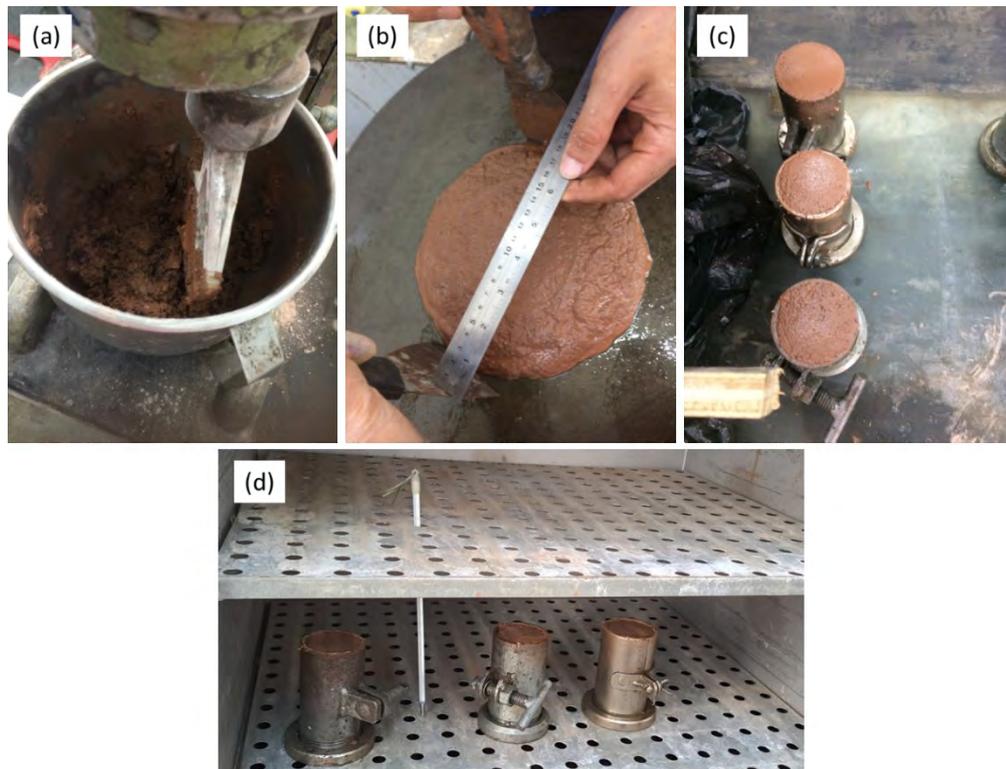


Figura 50 – (a) Produção da argamassa fabricada com cal e estéril, (b) verificação do espalhamento da mistura, (c) moldagem das argamassas e (d) cura em estufa (Fonte: A autora, 2024).



Figura 51 – Realização do ensaio de atividade pozolânica com a cal (Fonte: A autora, 2024).

3.2.3.7.2 Índice de desempenho com cimento

A determinação do índice de desempenho do estéril beneficiado com cimento Portland foi realizada aos 28 dias conforme a NBR 5752 (2014). A mistura dos materiais, moldagem dos corpos de prova, condições de cura e determinação da carga de ruptura à compressão foram adotadas conforme a NBR 7215 (2019). Na Figura 52, é apresentada uma foto da produção das misturas e na Figura 53, a realização do ensaio de compressão. O índice de desempenho foi calculado com base na Equação 9.

$$I_{cemento} = \frac{f_{cB}}{f_{cA}} \cdot 100 \quad \text{Equação 9}$$

Onde: $I_{cemento}$ é o índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias (em %), f_{cB} é a resistência média aos 28 dias da argamassa B (em MPa) e f_{cA} é a resistência média aos 28 dias da argamassa A (em MPa).



Figura 52 – Produção das argamassas A e B (Fonte: A autora, 2023).



Figura 53 – Realização do ensaio do índice de desempenho do estéril com cimento Portland (Fonte: A autora, 2024).

3.2.4 Ensaio realizados em argamassas e no ECC

3.2.4.1 Propriedades no estado fresco

3.2.4.1.1 Trabalhabilidade

A trabalhabilidade das misturas de argamassa e de ECC foi avaliada a partir do ensaio de consistência, segundo a NBR 13276 (2016). Para o ECC, foi adotada a mesma norma da argamassa visto que não há uma norma para compósitos cimentícios reforçados com fibras. Antes da execução do ensaio, a mesa para índice de consistência e o molde troncônico foram limpos e secos. O molde troncônico foi posicionado no centro da mesa e foi preenchido pela mistura, em três camadas de mesma altura, sendo aplicados em cada uma delas, respectivamente, quinze, dez e cinco golpes com o soquete. Em seguida, foi realizado o rasamento da mistura com o auxílio de uma régua metálica. O molde foi retirado verticalmente e foi girada a manivela da mesa, para que a mesma subisse e caísse 30 vezes em 30 segundos de maneira uniforme. Imediatamente após a última queda, foi medido o espalhamento horizontal da argamassa e do ECC. Por fim, o índice de consistência foi obtido pela média de três medidas de diâmetros. Este ensaio, também possibilitou verificar por inspeção visual se houve a ocorrência de segregação e/ou exsudação dos materiais da mistura.

Detalhes da realização do ensaio de consistência da mistura de argamassa são representados na Figura 54. Na Figura 55 é mostrado o espalhamento das misturas de ECC.



Figura 54 – Detalhes da execução do ensaio com a mistura de argamassa: (a) adensamento das camadas, (b) rasamento da mistura, (c) consistência da mistura após retirada do tronco cônico, e (d) espalhamento da mistura de argamassa com estéril (Fonte: A autora, 2024).

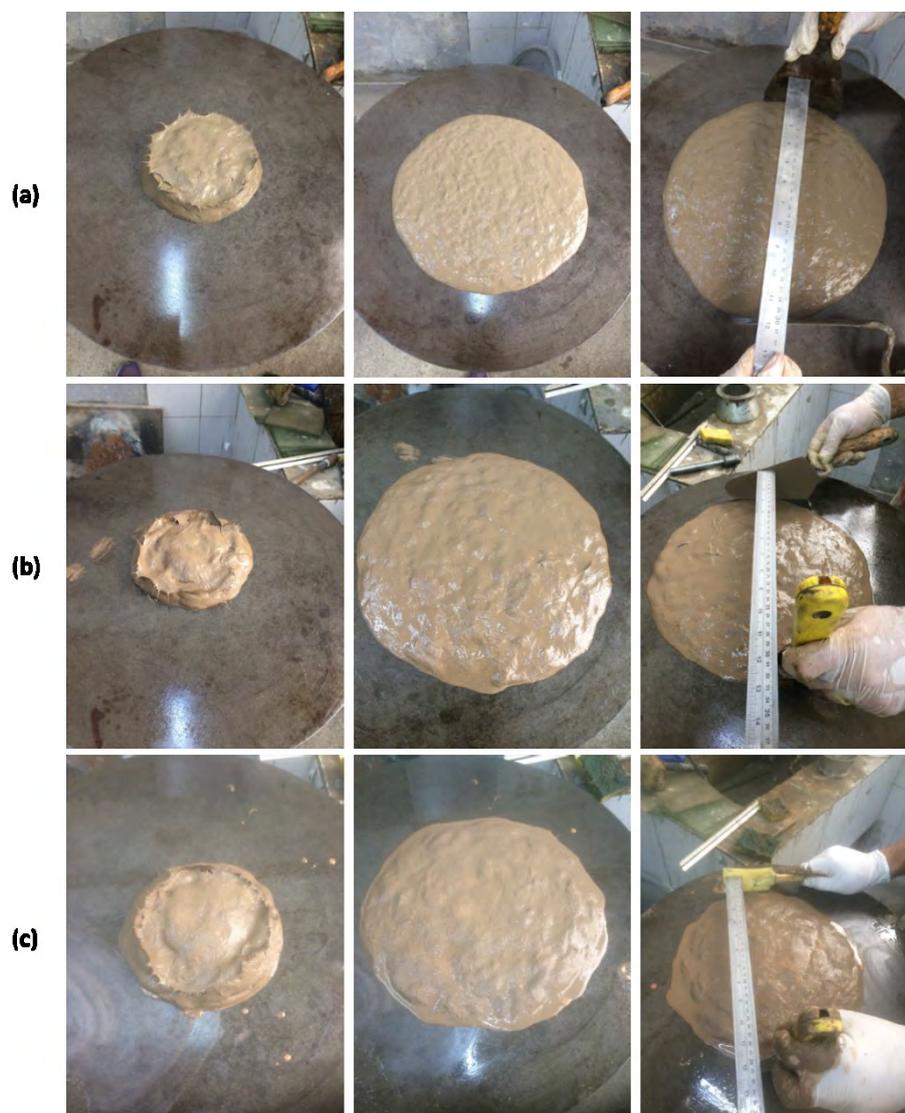


Figura 55 – Ensaio para a verificação da trabalhabilidade das misturas de ECC com estéril, sendo (a) C20, (b) C30 e (c) C30-1 (Fonte: A autora, 2024).

3.2.4.1.2 Massa específica

A massa específica da argamassa e do ECC no estado fresco foi determinada com base na NBR 13278 (2005). Para o ECC, foi adotada a mesma norma da argamassa visto que não há uma norma para compósitos cimentícios reforçados com fibras. No ensaio, a mistura foi adicionada em três camadas iguais em um recipiente cilíndrico calibrado. Em cada camada foi aplicado 30 golpes com o auxílio de um soquete. Por último, o recipiente foi pesado. A densidade da mistura no estado fresco foi calculada pela Equação 10 da referida norma.

$$\rho = \frac{m_c - m_v}{v_r} \cdot 1000 \quad \text{Equação 10}$$

Onde: ρ é a densidade da mistura no estado fresco (em kg/m³), m_c é a massa do recipiente cilíndrico contendo a mistura de ensaio (em g), m_v é a massa do recipiente cilíndrico vazio (em g) e v_r é o volume do recipiente cilíndrico (em cm³).

Na Figura 56 é ilustrada a realização do ensaio de massa específica da mistura de ECC com estéril.



Figura 56 – Ensaio de massa específica da mistura de ECC com estéril (Fonte: A autora, 2024).

3.2.4.2 Propriedades no estado endurecido

3.2.4.2.1 Massa específica, índice de vazios e absorção de água

A massa específica dos corpos de prova no estado endurecido foi determinada com base na NBR 9778 (2005), sendo o mesmo ensaio realizado para determinação da absorção de água do corpo de prova e índices de vazios. Para o ECC, foi adotada a mesma norma da argamassa uma vez que não há uma norma específica para o ECC. Foram ensaiados três corpos de prova cilíndricos com dimensões de 50 x 100 mm para cada mistura aos 28 dias. Na Figura 57 é ilustrado a realização do ensaio de massa específica no estado endurecido. Neste ensaio foram obtidas as massas específicas seca (Equação 11) e real (Equação 12) presentes na referida norma.

$$\rho_s = \frac{m_s}{m_{sat} - m_i} \quad \text{Equação 11}$$

$$\rho_r = \frac{m_s}{m_s - m_i} \quad \text{Equação 12}$$

Onde: ρ_s é a massa específica do corpo de prova seco (g/cm^3), ρ_r é a massa específica real (g/cm^3), m_{sat} é a massa do corpo de prova saturado em água após imersão e fervura (em g), m_s é a massa do corpo de prova seco em estufa (em g) e m_i é a massa do corpo de prova saturado em água após fervura (em g).

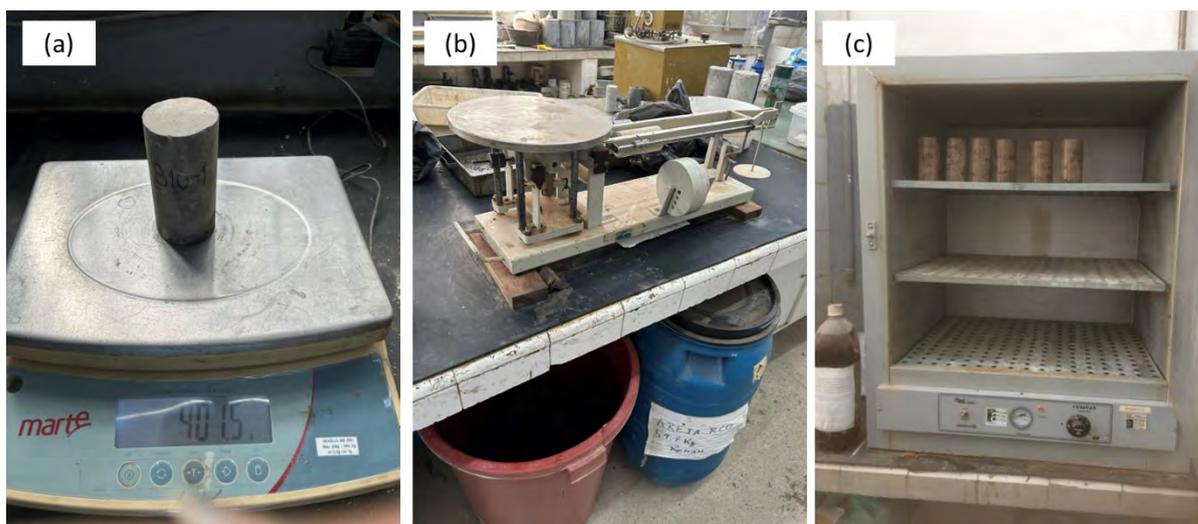


Figura 57 – Realização do ensaio de massa específica no estado endurecido aos 28 dias, sendo (a) e (b) pesagem do corpo de prova e (c) colocação dos corpos de prova na estufa (Fonte: A autora, 2024).

A absorção de água foi calculada pela Equação 13.

$$A = \frac{m_{sat} - m_s}{m_s} \cdot 100 \quad \text{Equação 13}$$

Onde: A é a absorção de água do corpo de prova (em %), m_{sat} é a massa do corpo de prova saturado em água após imersão e fervura (em g) e m_s é a massa do corpo de prova seco em estufa (em g).

E o índice de vazios foi obtido pela Equação 14.

$$I_v = \frac{m_{sat} - m_s}{m_{sat} - m_i} \cdot 100 \quad \text{Equação 14}$$

Onde: I_v é o índice de vazios do corpo de prova (em %), m_{sat} é a massa do corpo de prova saturado em água após imersão e fervura (em g), m_s é a massa do corpo de prova seco em estufa (em g) e m_i é a massa do corpo de prova saturado em água após fervura (em g).

3.2.4.2.2 Resistência à compressão axial e módulo de elasticidade

Os ensaios de resistência à compressão axial foram realizados nos corpos de prova de argamassa aos 7 e 28 dias e nos corpos de prova de ECC aos 28 dias, segundo a NBR 7215 (2019). Para o ECC foi adotada a mesma norma de argamassa por não haver norma específica para os compósitos. Antes dos ensaios, os corpos de prova foram secos ao ar e nivelados de forma a permitir a distribuição uniforme de tensões.

Para a realização do ensaio, foram utilizados, no mínimo, três corpos de prova cilíndricos com dimensões de 50 x 100 mm. Os ensaios foram realizados na máquina Forney, com capacidade máxima de 100 t. A carga foi aplicada de forma contínua com velocidade de carregamento de 0,25 MPa/s. A resistência à compressão foi obtida pela Equação 15.

$$\sigma = \frac{F}{A} = \frac{4.F}{\pi.D^2} \quad \text{Equação 15}$$

Onde: σ é a resistência à compressão do corpo de prova (em MPa), F é a carga aplicada (em N), A é a área da seção transversal do corpo de prova (em mm²) e D é o diâmetro do da seção transversal do corpo de prova (em mm).

Na Figura 58 é ilustrada a realização dos ensaios de resistência à compressão com a prensa Forney (Figura 58).



Figura 58 – Realização dos ensaios de resistência à compressão com o equipamento Forney (Fonte: A autora, 2024).

O módulo de elasticidade do corpo de prova de argamassa e de ECC foi determinado aos 28 dias com base no ensaio de resistência à compressão. Os ensaios foram realizados com a máquina Instron, com célula de carga com capacidade de 100 kN. Neste ensaio a carga foi aplicada até 30% da tensão máxima da argamassa de forma contínua com velocidade de carregamento de 0,25 MPa/s. Os extensômetros diametralmente opostos posicionados na região central do corpo de prova permitiram o monitoramento dos deslocamentos longitudinais do corpo de prova (Figura 59). O módulo de elasticidade foi calculado a partir da linha de tendência dos pontos do gráfico tensão versus deformação.



Figura 59 – Realização do ensaio de módulo de elasticidade (Fonte: A autora, 2024).

3.2.4.2.3 Tenacidade à fratura

O ensaio de tenacidade à fratura foi realizado em corpos de prova retangulares, com dimensões de 400 x 80 x 40 mm aos 28 dias, segundo a ASTM E399 (2012). O ensaio consistiu no teste de resistência a flexão em 3 pontos. O equipamento utilizado para o ensaio foi a Instron, com célula de carga com capacidade de 100 kN, com velocidade de carregamento de 0,6 mm/min. A carga foi aplicada de forma contínua.

Foram utilizados quatro corpos de prova retangulares com entalhe no meio do vão, cuja razão relativa de profundidade do entalhe e da altura da viga foi de 0,3. Na Figura 60 é mostrada a realização do ensaio de tenacidade à fratura da argamassa com estéril.

Para o cálculo da tenacidade à fratura da argamassa foi utilizado o método de mecânica de fratura elástica linear proposto por Li, Mishra e Wu (1995) devido ao tamanho reduzido da zona de processo de fratura na matriz sem agregado graúdo. De acordo com Xu e Reinhardt (1999) a tenacidade pode ser calculada pela Equação 16.

$$K_m = \frac{1,5 \cdot \left(P + \frac{m \cdot g}{2}\right) \cdot S \cdot \sqrt{\alpha}}{B \cdot W^2} \cdot f(\alpha) \quad \text{Equação 16}$$

Onde: K_m é a tenacidade da argamassa (em $\text{Mpa}\cdot\text{m}^{1/2}$), P é a carga máxima do ensaio de flexão (em N), S é o vão da viga (em mm), B é a largura da viga (em mm), W é altura do corpo de prova de argamassa (em mm), α é a razão da profundidade do entalhe (a) e a largura da viga e $f(\alpha) = \frac{1,99-\alpha\cdot(1-\alpha)\cdot(2,15-3,93\cdot\alpha+2,7\cdot\alpha^2)}{(1+2\cdot\alpha)\cdot(1-\alpha)^{3/2}}$.

Por fim, segundo Li (1993), a energia de fratura da argamassa pode ser calculada pela Equação 17.

$$J_{tip} = \frac{K_m^2}{E} \quad \text{Equação 17}$$

Onde: J_{tip} é a energia de fratura da argamassa (em J/m^2), K_m é a tenacidade da argamassa (em $\text{Mpa}\cdot\text{m}^{1/2}$) e E é o módulo de elasticidade da argamassa (em MPa).



Figura 60 – Realização do ensaio de tenacidade (Fonte: A autora, 2024).

3.2.4.2.4 Resistência à tração por compressão diametral

O ensaio de resistência à tração por compressão diametral foi realizado nos corpos de prova de argamassa aos 28 dias, e com base na NBR 7222 (2011). Os ensaios foram realizados na máquina Instron, com célula de carga com capacidade

de 100 kN. A resistência à tração por compressão diametral foi obtida pela Equação 18.

$$f_{ct,sp} = \frac{2F}{\pi \cdot d} \quad \text{Equação 18}$$

Onde: $f_{ct,sp}$ é a resistência à tração por compressão diametral (em Mpa), F é a força máxima alcançada (em N) e d é o diâmetro do corpo de prova (em mm).

Na Figura 61 é ilustrada a realização dos ensaios de resistência à tração por compressão diametral.



Figura 61 – Realização do ensaio de resistência à tração por compressão diametral (Fonte: A autora, 2024).

3.2.4.2.5 Comportamento na tração direta

A resistência à tração direta do ECC foi determinada aos 28 dias com base na recomendação japonesa da JSCE (2008). Foram utilizadas duas garras mecânicas rígidas nas extremidades do corpo de prova, a fim de garantir o alinhamento do corpo de prova em relação ao eixo de aplicação de carga. Para cada mistura, foram produzidos cinco corpos de prova prismáticos também conhecido como halter ou

osso, com dimensões de 30 x 30 x 330 mm (largura na parte central x espessura x comprimento total do corpo de prova), conforme é ilustrado na Figura 62.

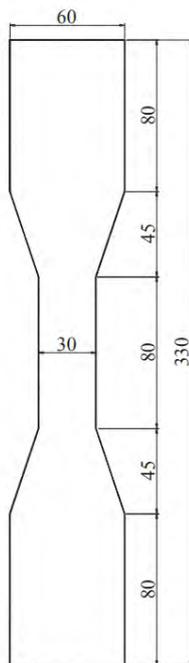


Figura 62 – Dimensões do corpo de prova que será utilizado nos ensaios de resistência à tração direta (Fonte: Magalhães, 2010).

O ensaio de resistência à tração foi realizado no equipamento Instron, com célula de carga com capacidade de 100 kN, com velocidade de carregamento de 0,1 mm/min conforme é mostrado na Figura 63. Foram utilizados dois extensômetros nas laterais dos corpos de prova com comprimento de 80 mm. Neste ensaio foram determinados os valores médios de tensão (σ_{cc}) e deformação (ϵ_{cc}) de primeira fissura, valores máximos pós-fissuração (σ_{pc}) e capacidade de deformação (ϵ_u) na tração direta a partir da curva de tensão versus deformação (Figura 64) utilizando a Equação 19.

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad \text{Equação 19}$$

Onde: σ é a resistência à tração direta do ECC (em MPa), F é a carga aplicada (em N) e A é a área da seção transversal do corpo de prova (em mm²).



Figura 63 – Realização do ensaio de resistência à tração da mistura de ECC com estéril
(Fonte: A autora, 2024).

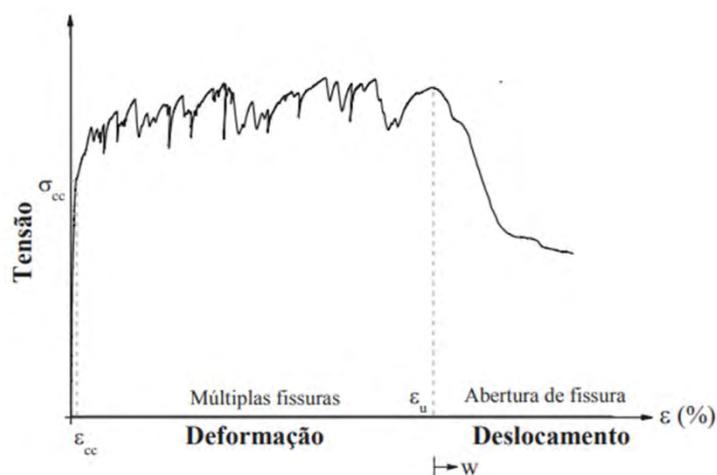


Figura 64 – Curva típica de um compósito com múltiplas fissura (Fonte: adaptado de Magalhães, 2010).

3.2.4.2.6 Comportamento na flexão

O ensaio de flexão em quatro pontos foi realizado aos 28 dias (Figura 65). Para este ensaio, foram produzidos cinco corpos de prova retangulares com dimensões de 12,5 x 60 x 400 mm para cada mistura e foi adotada uma distância entre os apoios de

300 mm de vão. O equipamento utilizado para o ensaio foi a Instron, com célula de carga com capacidade de 100 kN, com velocidade de carregamento de 0,6 mm/min. A carga foi aplicada de forma contínua. Foi utilizado um extensômetro com cursor de 14 mm de amplitude no meio do vão, de forma a medir os deslocamentos e foi gerada a curva tensão *versus* deslocamento dos compósitos. Foram obtidos os valores de tensão (σ_{cr}) e deslocamento (δ_{cr}) de primeira fissura e os valores de tensão (σ_u) e deslocamento (δ_u) máximo pós-fissuração dos compósitos. A tensão equivalente na flexão foi calculada pela Equação 20, conforme a NBR 12142 (2010).

$$\sigma = \frac{6M}{b.d^2} \quad \text{Equação 20}$$

Onde: σ é a tensão equivalente de flexão (em MPa), M é o momento fletor no meio do vão (em N.m), b é a dimensão da base do corpo de prova (em mm) e d é a altura do corpo de prova (em mm).



Figura 65 – Realização do ensaio de resistência à flexão da mistura de ECC com estéril (Fonte: A autora, 2024).

3.2.4.3 Análise estatística para interpretação dos resultados

Por fim, para a análise dos resultados dos ensaios nas argamassas e do ECC, foi aplicada a metodologia de análise estatística por ANOVA, calculada através de

uma ferramenta suplementar de editor de planilhas Excel. Esta metodologia de análise de variância, tem como objetivo comparar a média de população amostral, e assim identificar se essas médias diferem significativamente entre elas.

De acordo com Lewis (1995), a base da análise de variância está na comparação da variação entre grupos e da variação dentro dos grupos. A estimativa dentro de cada grupo ou tratamento é uma forma de analisar as correspondentes variações entre as amostras. Já a variação entre grupos permite a comparação entre os tratamentos. Uma vez que não é possível saber se as médias populacionais diferem de fato uma da outra, a razão entre as duas estimativas de variância permite verificar a ordem de tamanho da estimativa entre grupos, como forma de aceitá-la ou rejeitá-la (OLIVEIRA *et al.* 2022).

O editor de planilhas Excel, fornece um valor de F que é calculado com base na Equação 21.

$$F = \frac{MQ_{tratamento}^2}{MQ_e^2} \quad \text{Equação 21}$$

Onde F é o fator de ANOVA, $MQ_{tratamento}^2$ é a média quadrática do tratamento e MQ_e^2 é a média quadrática da população total. A rejeição ocorre com base na distribuição F de Fisher-Snedecor, quando $F > F_c$, que representa que o tratamento influenciou no resultado (MONTGOMERY e RUNGER, 2014). O F_c engloba a probabilidade de o teste apresentar diferenças não significativas (1- α) e considera dois graus de liberdade oriundos da análise de variância, para uma probabilidade de 5% (DA SILVA *et al.*, 2022).

Contudo, a metodologia ANOVA não permite a identificação dos distintos tratamentos. Para isto, é possível aplicar a análise de Tukey, que utiliza como base a Mínima Diferença Significativa (MDS), a qual é indicada na Equação 22. De acordo com esse método, o par de médias é declarado significativamente diferente para o caso em que a diferença entre as médias for superior à DMS (MONTGOMERY e RUNGER, 2014).

$$DMS = q \cdot \sqrt{\frac{QMR}{n^{\circ} \text{repetições}}} \quad \text{Equação 22}$$

Onde: DMS é a Mínima Diferença Significativa, q é o valor da amplitude total estudentizada, para uso no teste de Tukey, ao nível de 5% de probabilidade, QMR é o quadrado médio do resíduo obtido na tabela ANOVA, gerada pelo Excel, e

n^o *repetições* é o número de repetições com que foram calculadas as médias dos tratamentos.

4 PROPRIEDADES DO ESTÉRIL BRUTO, BENEFICIADO E CIMENTO

4.1 Introdução

Neste item é apresentado um detalhamento sobre as propriedades físico-química, mineralógica, morfológica e térmica do estéril bruto, obtido da extração do minério de ferro, estéril beneficiado e cimento. De forma a ser utilizado como substituto parcial do cimento, o estéril de mineração bruto sofreu um processo de beneficiamento por peneiramento, em que foram selecionadas as partículas com diâmetro dos grãos de até 75 μm . Desta forma, o estéril recebeu a nomenclatura de estéril beneficiado.

4.2 Estéril de minério de ferro bruto

A curva granulométrica do estéril é mostrada na Figura 66. Observa-se que esta curva engloba uma ampla faixa de granulometria, desde argila à pedregulhos. De forma geral, o estéril apresentou muitas partículas pequenas e poucas partículas mais graúdas, com tamanho de até 19 mm. O diâmetro médio das partículas (D_{50}) foi inferior à 75 μm e o diâmetro de 19% das partículas de estéril foi inferior à 10 μm . Além disso, verificou-se que a amostra é composta por cerca de 12% de pedregulho, 36% de areia, 48% de silte e 4% de argila podendo ser classificada como silte areno-argiloso com pedregulhos conforme à NBR 6502 (2022).

O elevado teor de finos é desejável para utilização do material como adição mineral do tipo fíler (BEZERRA, 2021; BAUER *et al.*, 2012; FONTES *et al.*, 2014). Além disso, o baixo tamanho de partículas, a alta finura e, conseqüentemente, a elevada área superficial são geralmente vantajosos para a reatividade pozolânica do material e para o efeito de empacotamento e preenchimento de vazios na matriz de cimento (CHINDAPRASIRT *et al.*, 2004). Destaca-se que, a fração mais grossa do estéril também poderia ser utilizado como agregado, todavia, necessita de um beneficiamento por peneiramento para ser inserida na zona utilizável da NBR 7211 (2022), conforme é indicado na Figura 66.

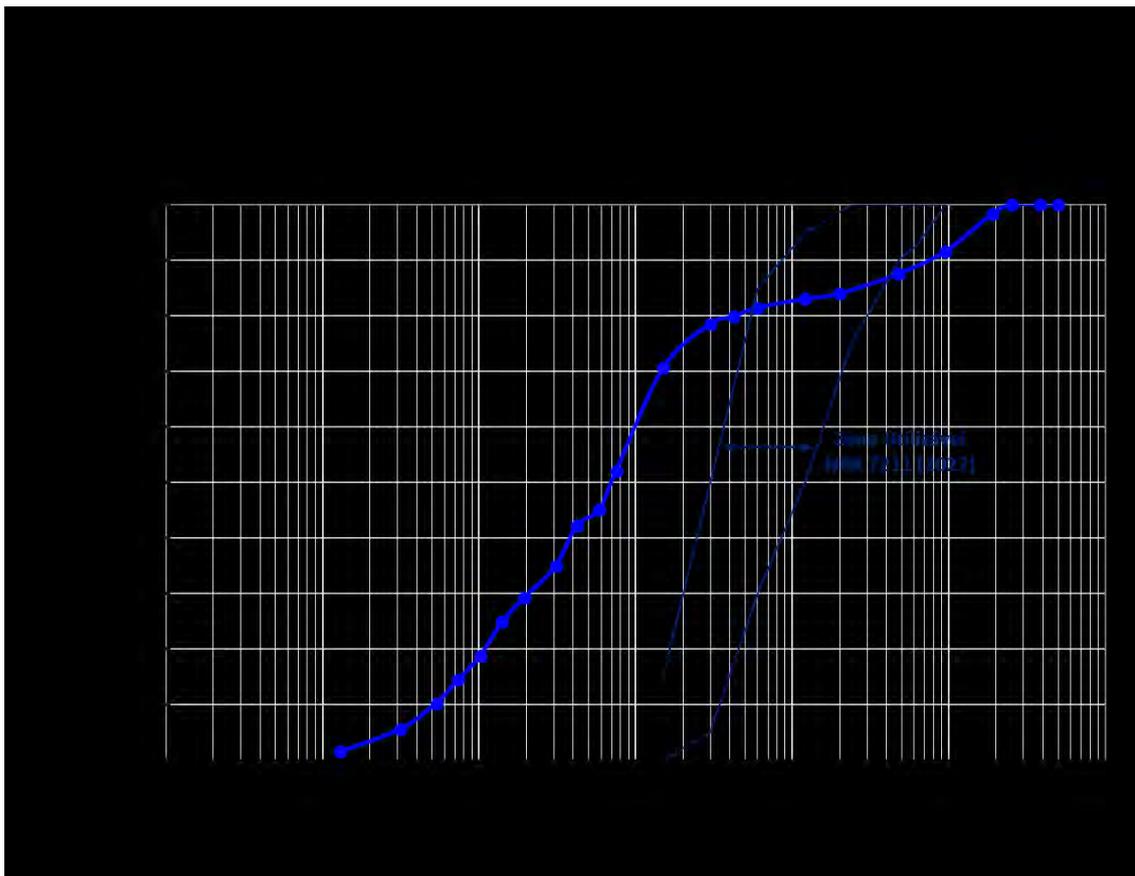


Figura 66 – Curva granulométrica do estéril (Fonte: A autora, 2024).

Na Tabela 11 são apresentadas as propriedades físicas obtidas para o estéril bruto. Observa-se que o estéril não apresentou plasticidade (Limites de Atterberg - NL e NP), ou seja, não possui deformações plásticas. Vale destacar que os ensaios de limite de Atterberg foram realizados como um ensaio adicional nesta pesquisa para a caracterização do material, assim como foi realizado por outros pesquisadores como Shamsi e Zakerinejad (2023).

Além disso, o estéril bruto possui uma densidade real igual a $2,79 \text{ g/cm}^3$, que é inferior à massa específica da maioria dos cimentos Portland (ver Item 4.3). Ainda, vale a pena destacar que a massa específica do estéril bruto é um pouco mais alta que a massa específica de agregados convencionais, devido à presença de diferentes elementos químicos em sua composição química.

Tabela 11 – Propriedades físicas do estéril bruto (Fonte: A autora, 2024).

Propriedades	Valor
Limite de Atterberg – Limite de liquidez (LL)	NL
Limite de Atterberg – Limite de plasticidade (LP)	NP
Teor de umidade w (%)	0,40
Densidade real dos grãos G_s (g/m ³)	2,79
Módulo de finura (%)	1,25
Dimensão máxima característica (mm)	19,00

Nota: NL – Não líquido e NP- não plástico

A morfologia das partículas do estéril bruto foi estudada a partir das imagens obtidas por microscopia eletrônica de varredura (MEV), que é representada na Figura 67. O estéril apresentou partículas finas de formato lamelar, cuja composição é formada principalmente por silício, alumínio e ferro e uma larga distribuição de tamanho de partículas, como foi detectado na granulometria. Além disso, é possível observar partículas menores aderidas às partículas lamelares, o que é característico de argilominerais (ANDRADE, 2014).

Tendo em vista que um grão de cimento possui diâmetro médio de 30 μm , as partículas inferiores a 75 μm possuirão, em sua maioria, diâmetros menores a este, sendo assim, as reações químicas podem ocorrer muito mais rápido, devido à alta área específica do estéril (PEDROSO, 2020). Desta forma, existe a possibilidade do material ser utilizado como material cimentício suplementar. Contudo, devido à sua textura e morfologia muito particulares, a inclusão do resíduo na mistura de cimento pode aumentar a demanda de água da mistura fresca o que pode reduzir a trabalhabilidade da mistura. O aumento da quantidade de água na mistura leva ao aumento da porosidade da amostra e conseqüentemente, à uma menor resistência à compressão (MEHTA e MONTEIRO, 2014).



Figura 67 – Imagens de microscopia eletrônica de varredura (MEV) com aproximação de (a) 60 μm e (b) 300 μm (Fonte: A autora, 2024).

Os resultados da quantificação de elementos por EDS da amostra de estéril são mostrados na Figura 68 até a Figura 70. Para esta análise, foram selecionadas três amostras obtidas por peneiramento do estéril. A primeira amostra possui somente grãos maiores que 75 μm , a segunda amostra possui grãos entre 45 μm e 75 μm , e a terceira amostra possui grãos menores que 45 μm . Os principais elementos identificados nas amostras foram Si, Al, Fe e K, algumas amostras também apresentam Mg e Ti.

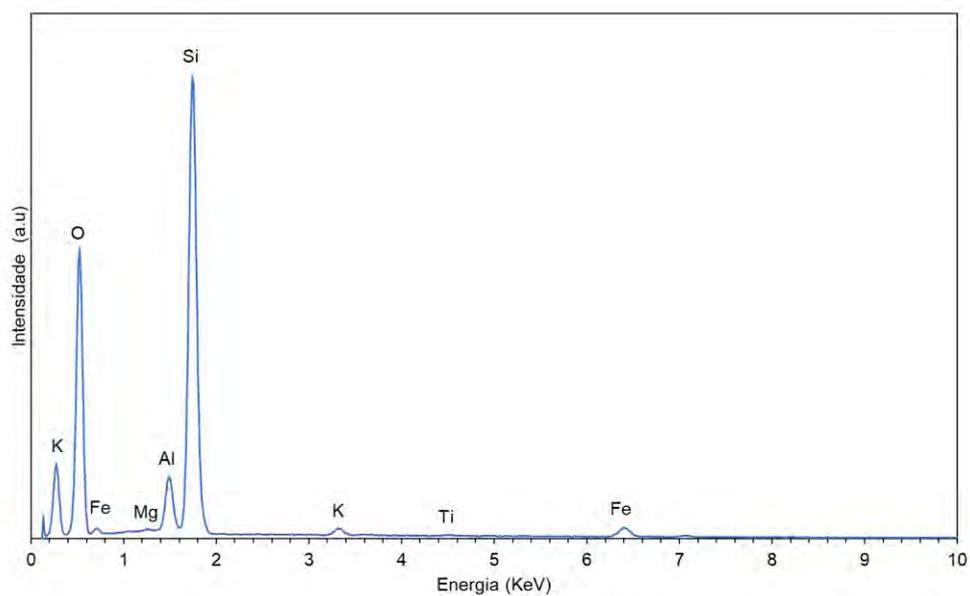
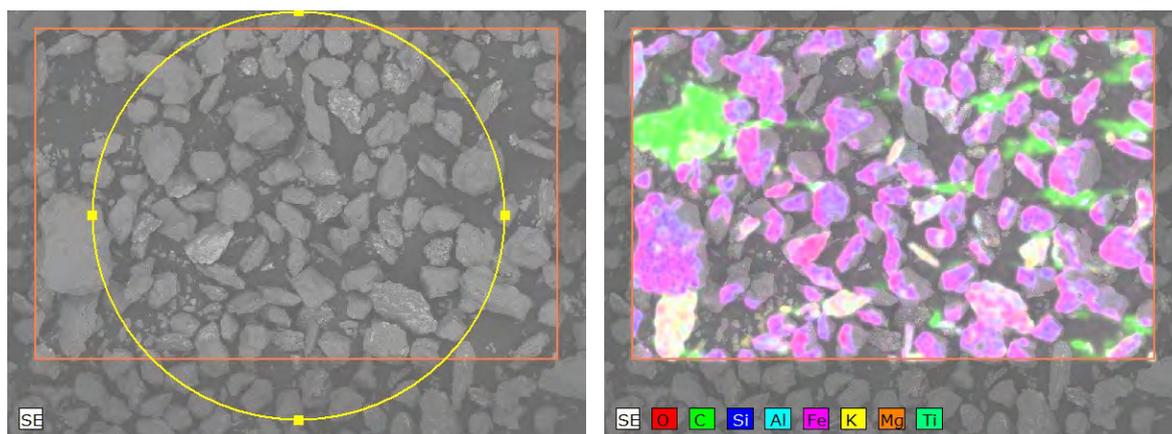


Figura 68 – Imagem obtida por microscopia eletrônica de varredura (MEV) com quantificação de elementos por EDS – grãos maiores que 75 μm (Fonte: A autora, 2024).

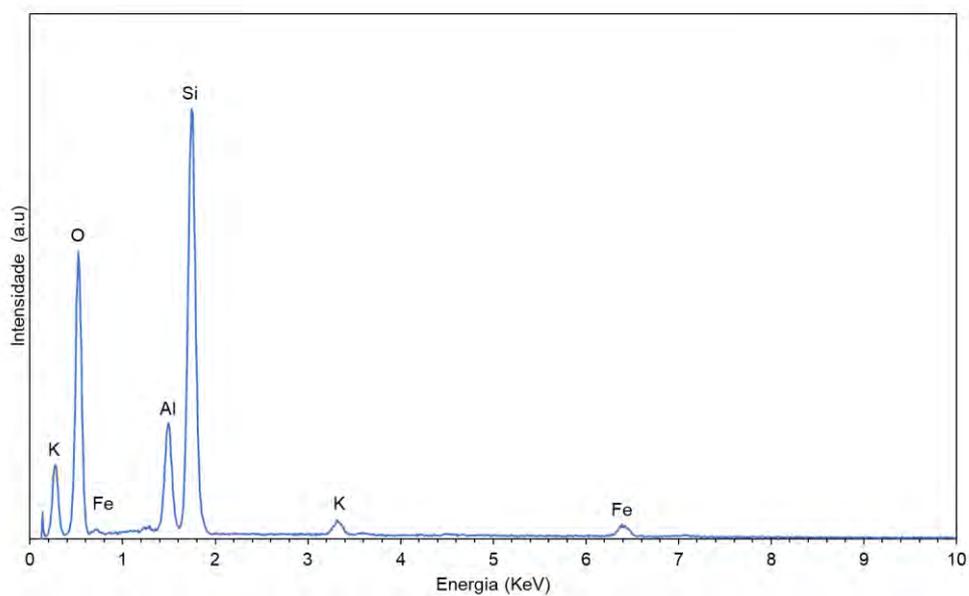
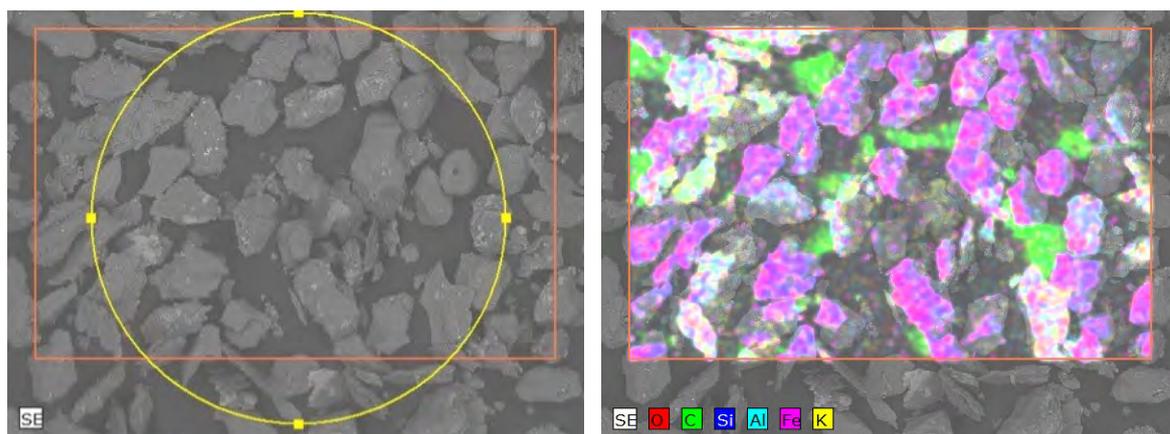


Figura 69 – Imagem obtida por microscopia eletrônica de varredura (MEV) com quantificação de elementos por EDS – grãos entre 45 μm e 75 μm (Fonte: A autora, 2024).

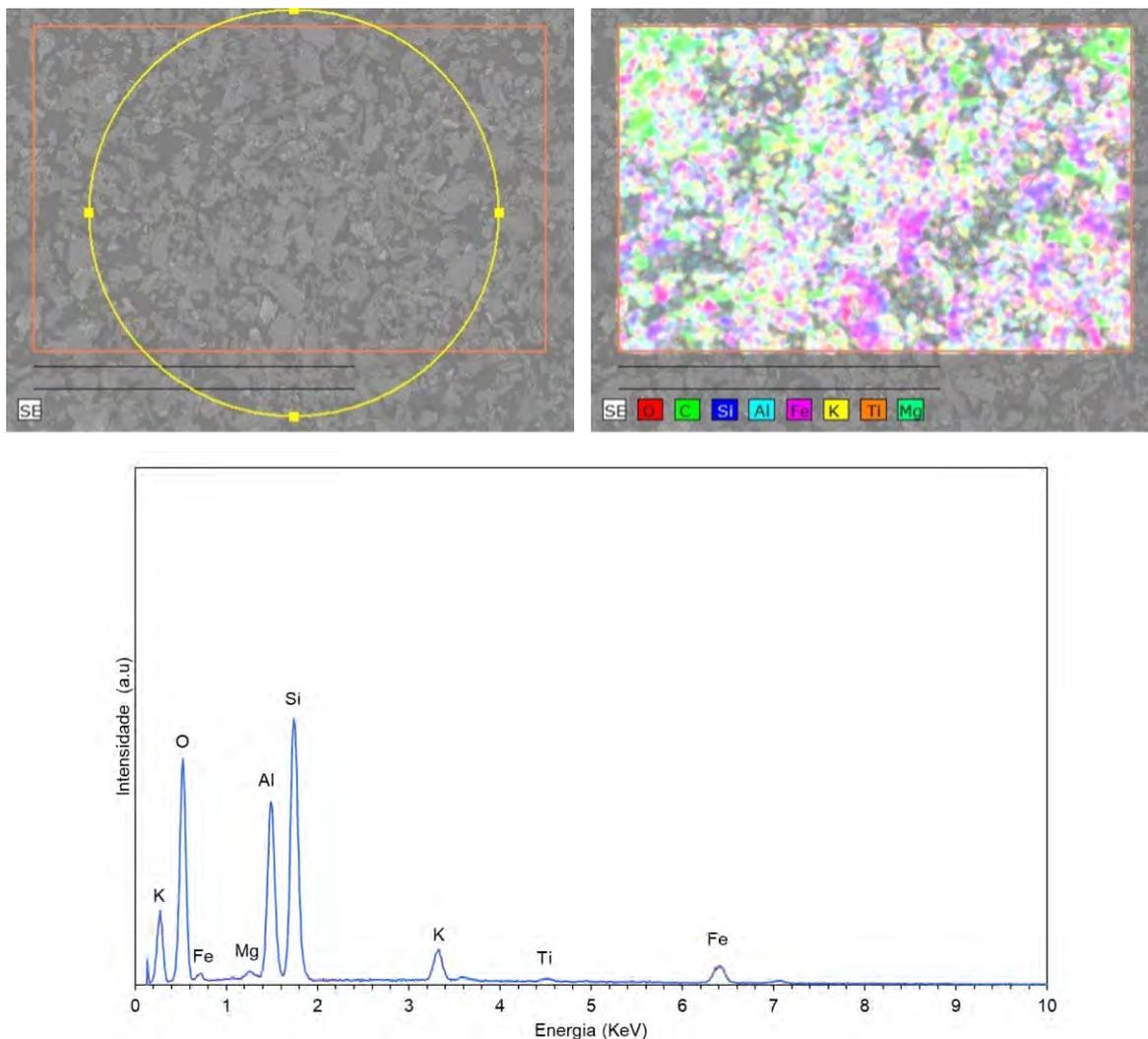


Figura 70 – Imagem obtida por microscopia eletrônica de varredura (MEV) com quantificação de elementos por EDS – grãos menores que 45 μm (Fonte: A autora, 2024).

Na Figura 71 é ilustrada uma comparação da quantidade de elementos obtidas por EDS em amostras com grãos $> 75 \mu\text{m}$, entre 45 μm e 75 μm , e $< 45 \mu\text{m}$. De forma geral, observa-se a maior ocorrência de Si nas amostras, que variou de 49,6 % a 78,2%. Os teores de Fe, Al e K também foram verificadas nas 3 amostras, chegando até 25,8% para o caso do Al (amostra com grãos $< 45 \mu\text{m}$). Vale ressaltar que essa quantificação, em geral, é muito dependente da região analisada da amostra.

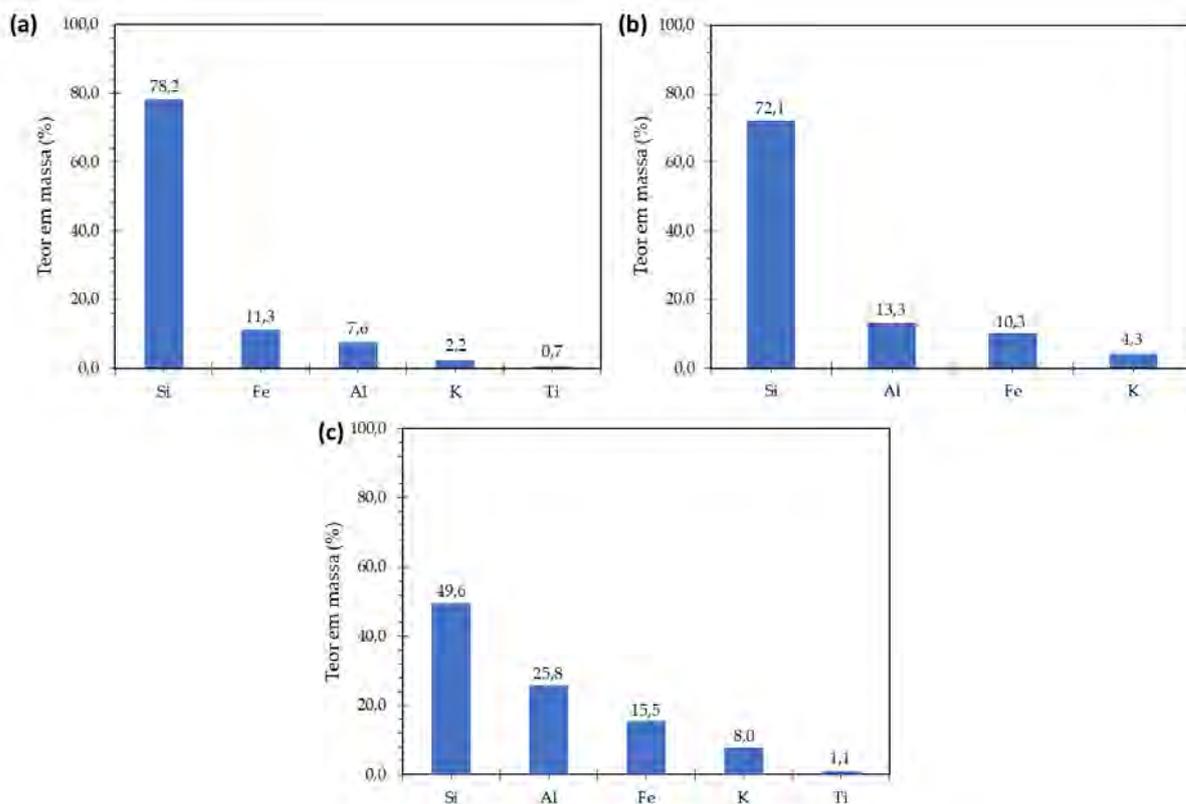


Figura 71 – Quantidade de elementos obtidas por EDS em amostras com diferentes tamanhos de grãos. (a) Grãos > 75 μm, (b) grãos entre 45 μm e 75 μm e (c) grãos < 45 μm (Fonte: A autora, 2024).

O difratograma obtido na análise da amostra de estéril é ilustrado na Figura 72. Para a identificação das fases cristalinas contidas na amostra foram usados os padrões do banco de dados do Crystallography Open Database. Na interpretação dos resultados foi identificada uma estrutura cristalina com a presença dos minerais quartzo, caulinita, biotita, goethita e hematita, cuja quantificação é mostrada na Tabela 12. Quartzo e caulinita aparecem em maiores concentrações, a biotita, em menor concentração, e a goethita e hematita, em concentrações inferiores a 1. Nos estudos de Bezerra (2017), que tiveram como base o rejeito proveniente da Cava Conceição, foram verificadas as fases mineralógicas de hematita, quartzo, caulinita, goethita, biotita, clorita e talco. Já no trabalho de Wolff (2009), os minerais identificados em Conceição foram a hematita, goethita, caulinita, quartzo, talco e muscovita. Estes resultados são coerentes com o resultado encontrado na presente pesquisa.

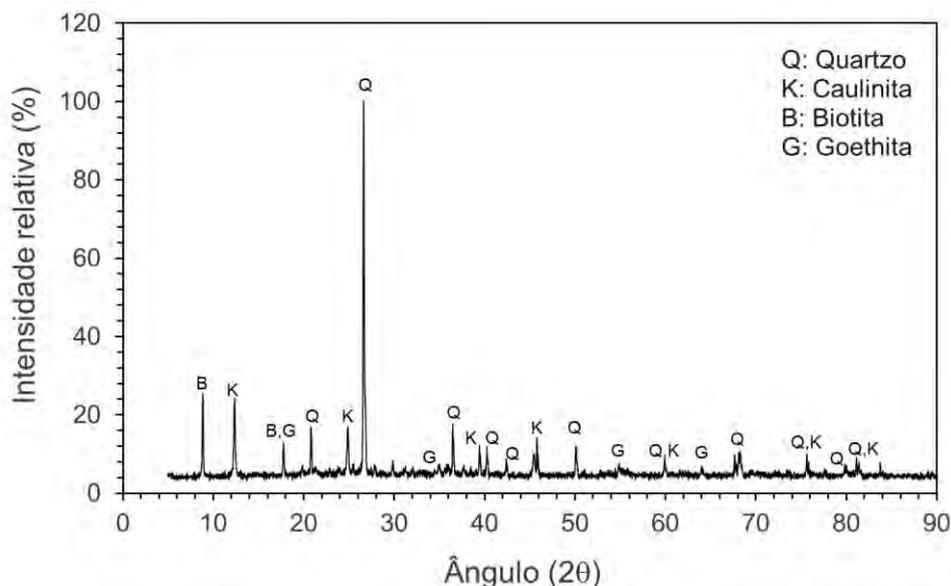


Figura 72 – Difratograma de raio X da amostra de estéril (Fonte: A autora, 2024).

Tabela 12 – Quantificação das fases mineralógicas do estéril (Fonte: A autora, 2024).

Mineral	Fórmula	Quantidade (%)
Quartzo	SiO ₂	62,8
Caulinita	Al ₂ H ₄ O ₉ Si ₂	27,1
Biotita	K(Mg ₂ Fe)(AlSi ₃ O ₁₀)(OH) ₂	9,0
Goethita	FeHO ₂	0,4
Hematita	Fe ₂ O ₃	0,7

Apesar da composição mineralógica do estéril ser próxima à de um material amorfo, é importante destacar que, pelo difratograma obtido, o estéril bruto apresenta uma estrutura cristalina, sendo necessário uma forma de ativação a fim de tornar sua estrutura amorfa, e conseqüentemente, um possível material reativo, uma vez que a reatividade da pozolana está diretamente relacionada a quantidade de silício e/ou alumínio amorfos no material e sua superfície específica (BEZERRA *et al.*, 2021). Seerig *et al.* (2019) propõe o tratamento térmico para o estéril através da calcinação rápida. Maruthupandian *et al.* (2021) avaliam métodos da ativação pozolânica mecânica, térmica e química de rejeitos que podem ser avaliadas também para o estéril.

4.3 Estéril beneficiado e cimento

De forma a ser utilizado como substituto parcial do cimento, o estéril de mineração bruto sofreu um processo de beneficiamento por peneiramento, em que foram selecionadas as partículas com diâmetro dos grãos de até 75 μm . Desta forma, o estéril recebeu a nomenclatura de estéril beneficiado.

Na Tabela 13 são apresentadas as propriedades físicas obtidas para o estéril beneficiado e cimento. Verifica-se que a massa específica do estéril beneficiado é menor que a massa específica real do cimento. Novamente, vale destacar que a massa específica do estéril beneficiada é ligeiramente inferior a massa específica do estéril bruto devido ao fato do estéril bruto abranger uma ampla faixa granulométrica, podendo haver assim uma composição química diferente. Quanto ao índice de finura na peneira de 45 μm , observa-se que o estéril apresenta índice maior que o cimento. No entanto, a superfície específica do estéril é cinco vezes superior à superfície específica do cimento.

Tabela 13 – Propriedades físicas do estéril beneficiado e do cimento (Fonte: A autora, 2024).

Ingrediente	Propriedades	Valor
Estéril beneficiado	Massa específica real (g/m^3)	2,74
	Absorção de água (%)	0,85
	Módulo de finura – peneira de 75 μm (%)	0,00
	Módulo de finura – peneira de 45 μm (%)	27,80
	Superfície específica (m^2/g)	7,99
Cimento	Massa específica real (g/m^3)	3,08
	Módulo de finura – peneira de 75 μm (%)	0,00
	Módulo de finura – peneira de 45 μm (%)	0,60
	Superfície específica (m^2/g)	1,30

Na Tabela 14 é apresentada a composição química do estéril. O estéril exibe baixo teor de cálcio (teor de 0,32%, em peso) e elevado percentual (em peso) de sílica, alumínio e óxido de ferro, sendo respectivamente, 60,1%, 21,4% e 12,1%. Os componentes menores são K_2O , MnO (< 0,001%) e ZnO (0,03%). Poucos compostos tóxicos estão presentes, como cromo, chumbo e cobre, mas com percentuais inferiores a 0,001%, e SO_3 não foi detectado. Segundo Cezar (2021), os principais

componentes químicos do cimento CPV-ARI são óxido de cálcio (72,16%), óxido de silício (14,32%), óxido de alumínio (3,77%) e óxido sulfúrico (3,92%). Portanto, a composição química do estéril é deferente da composição do cimento.

A perda ao fogo do estéril foi de 4,28% e a do cimento de 1,72%, sendo a perda ao fogo do estéril cerca de 1,5 vezes superior ao do cimento, provavelmente devido a umidade e diferentes componentes químicos presentes no estéril. Há de se destacar que apesar da perda ao fogo do estéril ser superior ao cimento, seu valor é relativamente baixo, não impactando de forma significativa em suas aplicações em materiais cimentícios.

Tabela 14 – Composição química do estéril (Fonte: A autora, 2024).

Óxido	Valor (%)
SiO ₂	60,1
Al ₂ O ₃	21,4
Fe ₂ O ₃	12,1
K ₂ O	3,74
TiO ₂	1,07
P ₂ O ₅	0,59
Cl	0,35
CaO	0,32
ZrO ₂	0,04
Cr ₂ O	0,04
ZnO	0,03
CuO	0,02
Rb ₂ O	0,01
NiO	0,01
Outros componentes	<0,01

Com base na composição química do estéril utilizado nesta pesquisa, e diversos outros tipos de materiais cimentícios suplementares utilizados em substituição parcial do cimento, foram elaborados os gráficos de diagrama ternário ilustrados da Figura 73 e Figura 74. Apesar o estéril não ser um material pozolânico dada sua forma cristalina, foi realizada sua comparação com adições minerais visando

subsidiar futuras pesquisas que promovam a transformação da fase cristalina do estéril em fase amorfa.

A distribuição ternária do estéril é semelhante à distribuição da cinza volante a qual é ilustrada na Figura 73. Além disso, de forma geral, a distribuição ternária do estéril é semelhante à do rejeito brasileiro proveniente do Quadrilátero Ferrífero (QFe), que é representada na Figura 74. Também é semelhante a composição química do estéril de filito brasileiro (QFe), do estudo de Seerig (2019), contudo, quando comparado com a composição do estéril brasileiro obtida por Garajau (2019) é bastante divergente. Almada (2021) justifica que a composição química de resíduos de mineração (estéril e rejeito) depende do processamento do minério e do local de coleta, desta forma, pode apresentar grandes variações.

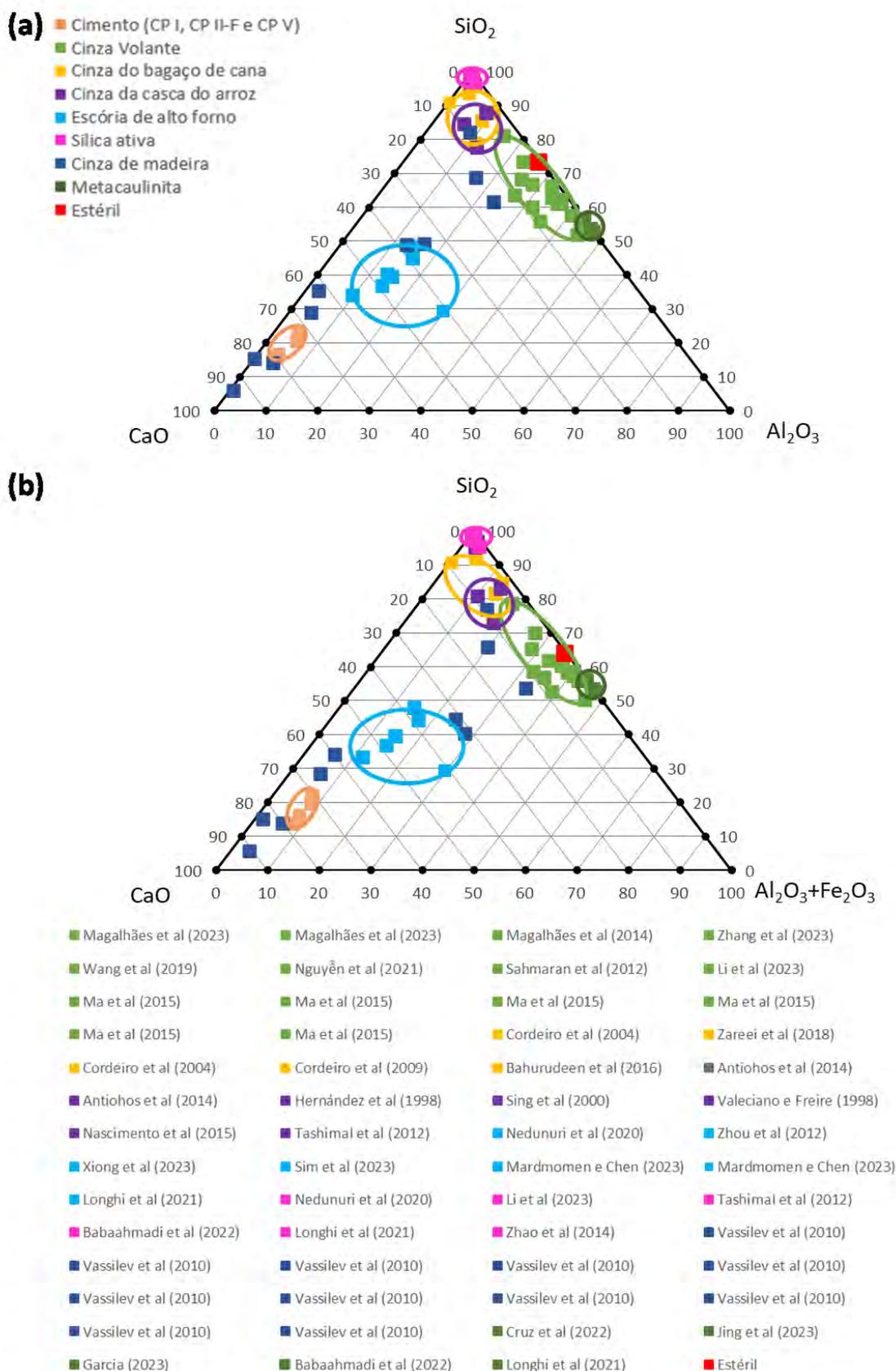


Figura 73 – Comparação da composição química do estéril do presente estudo (em vermelho) com outros tipos de adições minerais em termos dos óxidos (a) SiO_2 , CaO e Al_2O_3 e (b) SiO_2 , CaO e $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ (Fonte: A autora, 2024).

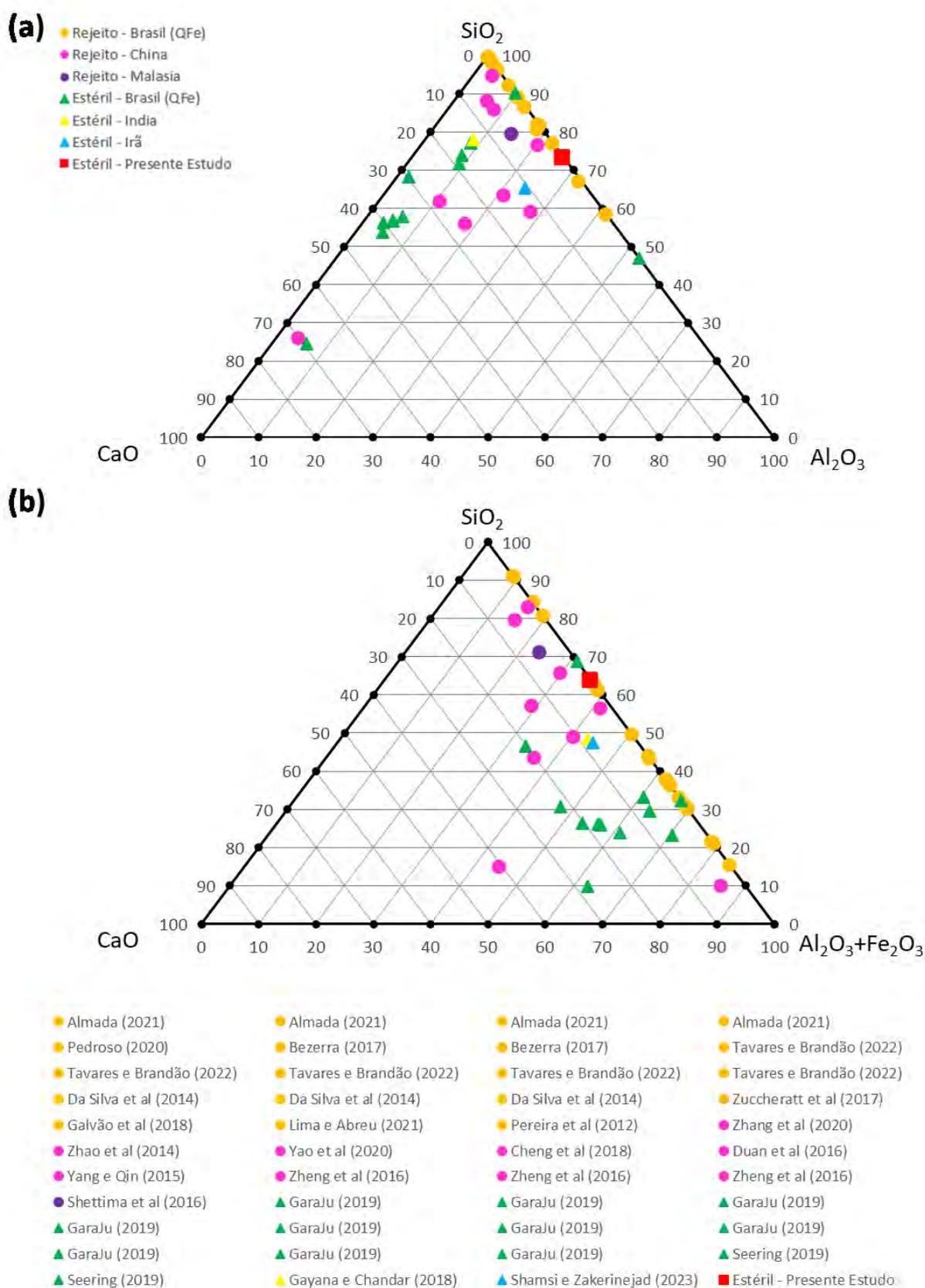


Figura 74 – Comparação da composição química do estéril do presente estudo (em vermelho) com o rejeito e estéril de minério de ferro em termos dos óxidos (a) SiO_2 , CaO e Al_2O_3 e (b) SiO_2 , CaO e $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ (Fonte: A autora, 2024).

De forma a verificar se o estéril beneficiado poderia ser um material pozolânico foram verificados os requisitos químicos, físicos e mecânicos estabelecidos na NBR 12653 (2014). Os requisitos químicos são indicados na Tabela 15 e os requisitos físicos na Tabela 16. Nas referidas tabelas são apresentados os resultados do estéril beneficiado. Verifica-se que o estéril beneficiado não atende aos requisitos de um material pozolânico, em termos de teor de álcalis, finura e atividade pozolânica. Todavia, há de se destacar que apesar do estéril não ser um material pozolânico, houve um ganho de resistência considerável no ensaio de índice de desempenho com o cimento Portland aos 28 dias de idade, indicando um desejável efeito fíler.

Tabela 15 – Comparação dos resultados do estéril com os requisitos químicos para um material pozolânico (Fonte: NBR 12653, 2014).

Propriedades (em %)	Classe de material pozolânico			Estéril (%)
	N	C	E	
$\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$	≥ 70	≥ 70	≥ 50	93,60
SO_3	≤ 4	≤ 5	≤ 5	0,00
Teor de umidade	≤ 3	≤ 3	≤ 3	0,40
Perda ao fogo	≤ 10	≤ 6	≤ 6	4,28
Álcalis disponíveis em Na_2O	$\leq 1,5$	$\leq 1,5$	$\leq 1,5$	2,46*

*Calculada como $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}} = \text{Na}_2\text{O} + 0,685 \cdot \text{K}_2\text{O}$.

Tabela 16 – Comparação dos resultados do estéril com os requisitos físicos para um material pozolânico (Fonte: NBR 12653, 2014).

Propriedades	Classe de material pozolânico			Estéril
	N	C	E	
Material retido na peneira $45 \mu\text{m}$ (em %)	< 20	< 20	< 20	27,80
Índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias, em relação ao controle (em %)	≥ 90	≥ 90	≥ 90	66,00
Atividade pozolânica com cal aos sete dias (em MPa)	≥ 6	≥ 6	≥ 6	0,87

Por fim, o resultado das análises termogravimétricas é apresentado na Tabela 17 e nas Figura 75 e Figura 76. O estéril apresentou perda de massa de 3,87% para a temperatura variando de 27 a 1000°C . Os picos observados na curva DTG indicam que houve a desidroxilação da goethita ($304,32^\circ\text{C}$) e da caulinita ($514,12^\circ\text{C}$). Estes valores são similares aos verificados por Alves *et al.* (2008), em que à desidroxilação

da goethita ocorreu entre 250 e 300°C e da caulinita, entre 450 e 550°C. Segundo Da Silva (2014), a desidroxilação da goethita inicia-se em torno de 260°C e termina em torno de 340°C e para a caulinita, a perda máxima ocorre para a temperatura de 540°. No caso da hematita, diferentemente da goethita, que possui grupos OH em sua estrutura cristalina, o óxido de ferro não apresenta nenhuma redução expressiva em massa com o aumento da temperatura até 1000°. Netzsch (2014) aponta que para o quartzo, o fluxo de calor endotérmico ocorre na faixa de 575° C, devido à transição estrutural de $\alpha \rightarrow \beta$. Portanto, o resultado da análise térmica é coerente com os resultados de composição mineralógica do estéril.

Tabela 17 – Perda de massa a partir das curvas TG/DTG (Fonte: IPT, Relatório de Ensaio Nº 1 146 513-203, 2023).

Perda de massa em função da temperatura						Perda total (%)
Faixa de temperatura (° C)	27-201	201-375	375-622	622-700	700-1000	3,87
Perda (%)	0,29	0,38	1,58	0,43	1,19	

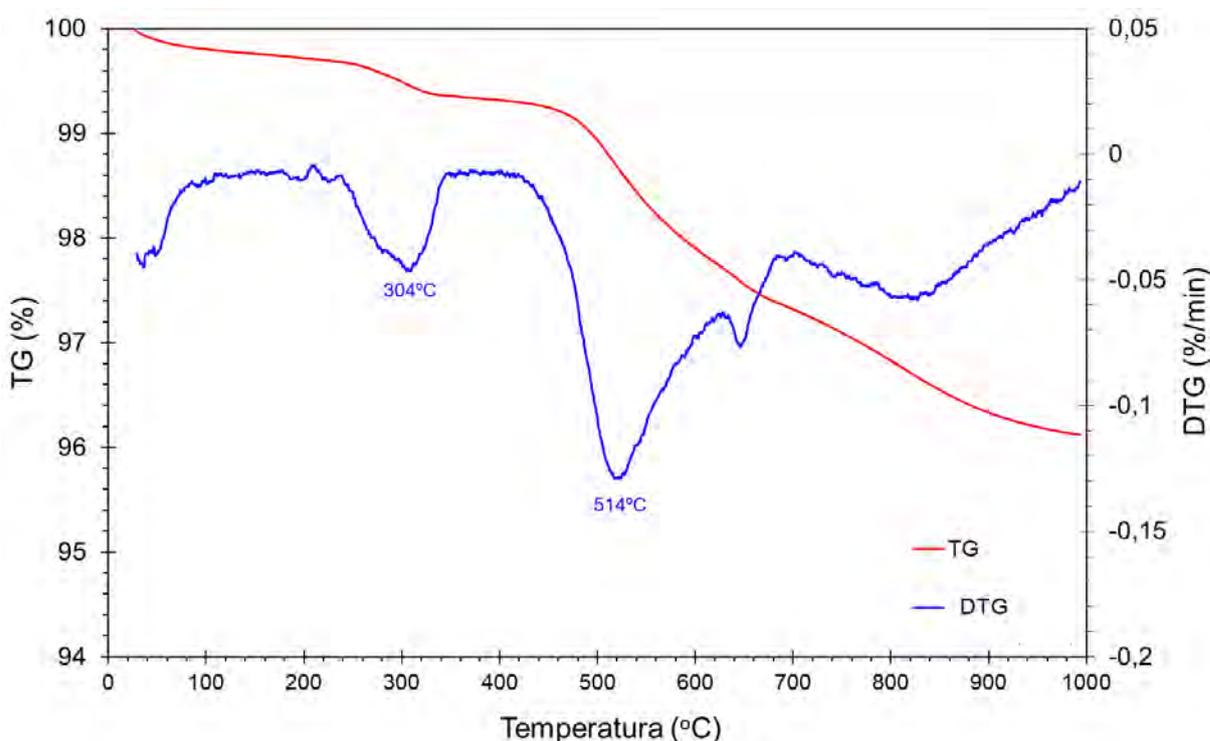


Figura 75 – Resultado da análise térmica - Curvas TG e DTG (Fonte: A autora, 2024).

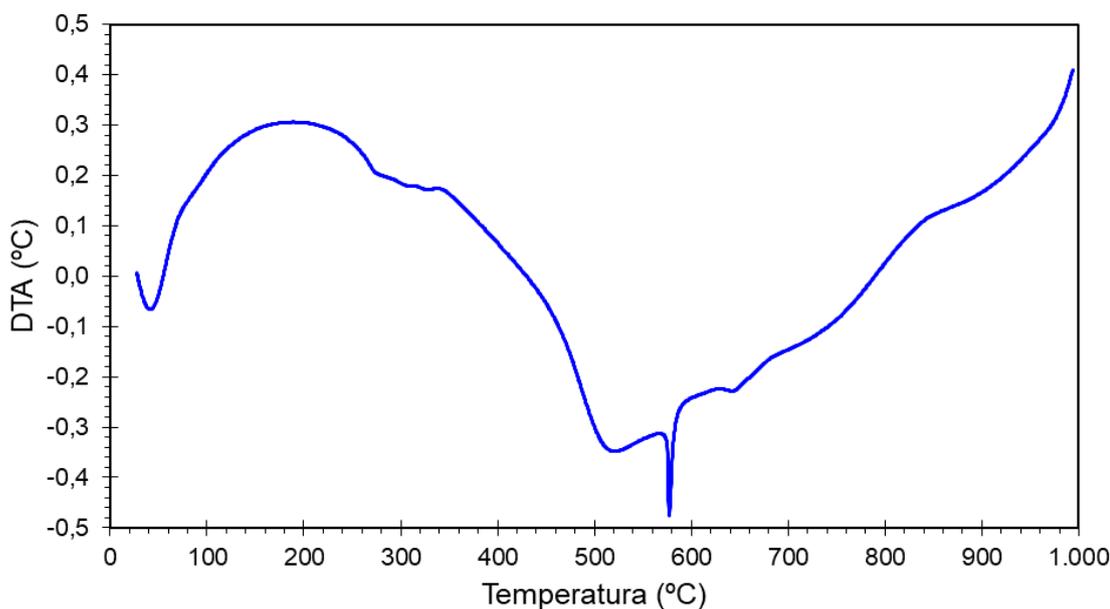


Figura 76 – Resultado da análise térmica – Curva DTA (Fonte: A autora, 2024).

4.4 Conclusão

A partir dos ensaios de caracterização do estéril, conclui-se que o estéril apresenta forte potencial para ser aplicado em materiais cimentícios, tanto como adição mineral, quanto agregado. Sua fração fina correspondeu, principalmente, à granulometria de um material pulverulento (fração inferior a 75 μm), representando cerca de metade da amostra de estéril, o que dá um forte indicador para sua utilização como adição mineral.

A princípio, a morfologia do estéril, com partículas ultrafinas de formato lamelar, indica uma possibilidade para a redução da trabalhabilidade das misturas cimentícias, em virtude do aumento da demanda de água na mistura. Já a análise das fases mineralógicas mostrou-se coerente com outros estudos de resíduos da mesma cava de extração do minério de ferro, assim como os resultados da análise térmica. Todavia, o difratograma de raio X indica que o estéril é caracterizado por fase cristalina, sendo necessário algum tipo de tratamento mecânico, térmico ou químico de modo a aumentar sua reatividade e torná-lo amorfo.

O processo de beneficiamento do estéril, por peneiramento, sem moagem ou tratamento térmico, apresentou excelentes resultados. O índice de finura do estéril

beneficiado é superior ao do cimento. No entanto, a superfície específica do estéril é cinco vezes superior à área específica do cimento. Quanto a sua composição química, foram verificados poucos compostos tóxicos presentes, como cromo, chumbo e cobre, mas com percentuais inferiores a 0,001%, e SO_3 não foi detectado. De forma geral, a distribuição ternária do estéril é semelhante a outros estudos do rejeito brasileiro proveniente do Quadrilátero Ferrífero (QFe).

Apesar do estéril beneficiado não atingir os requisitos da NBR 12653 (2014) para ser um material pozolânico e não ser amorfo, os resultados de caracterização foram promissores para sua aplicação como fíler em argamassas e em compósitos cimentícios reforçados com fibra como o ECC. O uso de adições minerais, como fíler em materiais cimentícios, pode reduzir a exsudação e segregação, pode aumentar a resistência à compressão e reduzir a permeabilidade da mistura, devido ao refinamento dos poros, além de melhorar a durabilidade do material, com maior resistência ao gelo/degelo, maior resistência ao ataque por sulfato e minimizar a reação álcali-agregado (POGGIALI, 2010; BARDINI, 2008; SOARES, 2010; BEZERRA, 2017; BEZERRA *et al.*, 2021).

5 DESENVOLVIMENTO DE ARGAMASSAS COM O USO DE ESTÉRIL DE MINERAÇÃO

5.1 Misturas das argamassas

Para a produção das misturas de argamassas foram utilizados cimento, estéril beneficiado, areia fina e água. A descrição destes materiais foi apresentada no item 3.1 e a caracterização do estéril e do cimento no Item 4.

Na pesquisa foram produzidas 3 misturas de argamassa, as quais variavam o teor de estéril, utilizado em substituição (em massa) do cimento. Os teores de estéril utilizados foram 10%, 20% e 30%. Além disso, foi produzida uma mistura com somente cimento, que foi chamada de mistura de referência. A quantidade de cada material utilizado para a produção das misturas de argamassa está na Tabela 18. Assim, a mistura B0 é a mistura de referência, com somente cimento, a mistura B10 é a mistura com 10% de estéril e 90% de cimento, a mistura B20 é a mistura com 20% de estéril e 80% de cimento, e a mistura B30 é a mistura com 30% de estéril e 70% de cimento. A proporção de material cimentício, areia e água nas misturas foi mantido constante, e é igual a 1:0,36:0,40. O teor de material cimentício, nesta pesquisa, foi considerado como cimento + estéril.

Tabela 18 – Quantidades de materiais em kg/m³, nas mistura de argamassa (Fonte: A autora, 2024).

Mistura	Teor de estéril (em %)	Quantidade (kg/m ³)			
		cimento	estéril	areia	água
B00	0	1161,39	0,00	418,10	464,56
B10	10	1040,38	115,60	416,15	462,39
B20	20	920,50	230,12	414,22	460,25
B30	30	801,72	343,59	412,31	458,12

5.2 Produção dos corpos de prova de argamassas

Para os corpos de prova de argamassa foram utilizados dois tipos de formas, a primeira corresponde a forma para um corpo de prova cilíndrico com dimensões de 50 x 100 mm e a segunda para um corpo de prova retangular com dimensões de 400 x 80 x 40 mm. Os corpos de prova cilíndricos foram utilizados para os ensaios de compressão axial e diametral, índice de vazios e massa específica da argamassa no estado endurecido. E os corpos de prova retangulares foram utilizados para o ensaio de tenacidade ao fraturamento. As formas utilizadas para produção dos corpos de prova são representadas na Figura 77. Mais detalhes sobre estes ensaios foram apresentados no Item 3.2.4.



Figura 77 – Formas utilizadas para a produção dos corpos de prova: (a) cilíndrica e (b) retangulares (Fonte: A autora, 2024).

A produção das misturas de argamassa teve como base os procedimentos da NBR 7215 (2019). As misturas foram produzidas em uma argamassadeira (Figura 78) com capacidade de 20l.



Figura 78 – Argamassadeira utilizada para a produção das misturas de argamassa e de ECC (Fonte: A autora, 2024).

Inicialmente, o estéril foi misturado ao cimento e, em seguida, misturado a areia. Desta forma, os materiais secos foram adicionados na argamassadeira em duas etapas. Na primeira, inseriu-se metade dos materiais secos e metade da quantidade de água e iniciou-se a argamassadeira até obter uma mistura homogênea. Em seguida, foi acrescentado o restante dos materiais secos e a água, e continuou-se o processo de mistura. O tempo para a mistura dos materiais na argamassadeira foi em média de 8 a 10 minutos. Na Figura 79 é apresentada a produção das argamassas. Observa-se que o estéril alterou a cor da mistura no estado fresco, tornando-a mais avermelhada em ambos os casos, o que pode ser justificado pelo fato do resíduo ser proveniente do minério de ferro.



Figura 79 – Produção das misturas – Comparação das misturas de argamassa (a) sem e (b) com adição de 30% de estéril (Fonte: A autora, 2024).

Ainda com a mistura no estado fresco, foram realizados os ensaios de espalhamento e de massa específica, que foram descritos no item 3.2.4.1. Logo depois, a mistura fresca foi colocada nos moldes. No adensamento dos corpos de prova cilíndricos, foram aplicados 40 golpes em 4 camadas e nos corpos de prova retangulares, foram aplicados 100 golpes em 3 camadas. A moldagem e o adensamento dos corpos de prova são ilustrados na Figura 80.

O processo de produção das argamassas e moldagem foram realizados em ambiente climatizado ($23^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$). A cura nas primeiras 24 horas foi realizada em ambiente úmido (Figura 81a e b). Após 24 horas da produção das argamassas, os corpos de prova foram desmoldados, identificados e imersos em tanque de água saturado com hidróxido de cálcio, para a cura final até as datas dos ensaios experimentais (Figura 81c).

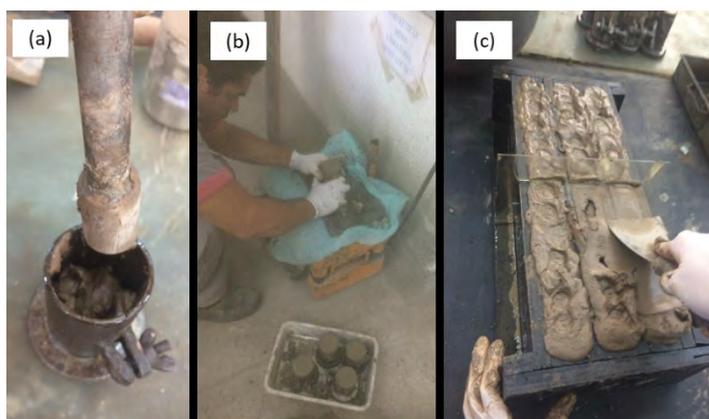


Figura 80 – Moldagem e adensamento dos corpos de prova – (a) e (b) adensamento dos corpos de prova e (c) preenchimento das formas e alisamento do corpo de prova (Fonte: A autora, 2024).



Figura 81 – (a) e (b) Primeiras 24 horas após a produção das misturas, sendo (a) preparação para a cura dos corpos de prova em ambiente úmido, (b) identificação dos corpos de prova e (c) cura dos corpos de prova imersos em água, após 24 horas até a data dos ensaios (Fonte: A autora, 2024).

Na Figura 82 é apresentada uma comparação da influência do teor de substituição de cimento por estéril na coloração das misturas no estado endurecido. Observa-se que quanto maior o teor de estéril, mais avermelhada é a mistura. Isto é justificado pelo estéril ser um resíduo do minério de ferro, conforme é verificado na Tabela 14.

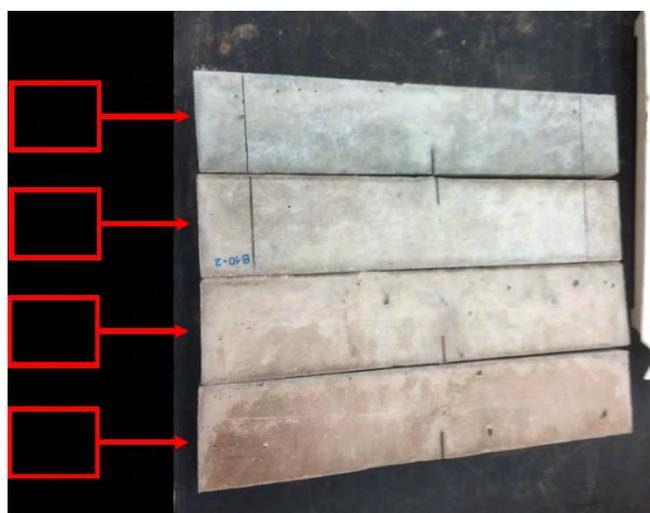


Figura 82 – Influência do uso do estéril na coloração dos corpos de prova de argamassa (Fonte: A autora, 2024).

5.3 Propriedades físicas e mecânicas das argamassas

5.3.1 Propriedades no estado fresco

Em relação aos ensaios nas argamassas no estado fresco, o ensaio de consistência (Tabela 19 e Figura 83) indicou que a trabalhabilidade da mistura parece ter sido pouco afetada pela substituição de cimento por estéril. A mistura permaneceu trabalhável até o teor de 30%, não sendo necessário aumentar a relação água/material cimentício ou o uso de superplastificante. A análise ANOVA forneceu um F de 3,14, que foi inferior ao F_c de 6,59, portanto, os valores médios do espalhamento das misturas, são estatisticamente iguais. Desta forma, observa-se que os formatos lamelares observados na análise por MEV não interferiram de forma significativa na demanda de água, conforme era previsto por Mehta e Monteiro (2014).

Tabela 19 – Resultado do ensaio de consistência e de massa específica da mistura de argamassa no estado fresco (Fonte: A autora, 2024).

Teor de estéril (%)	Espalhamento (cm)	DP	ρ médio (g/cm ³)	DP
0	24,5	1,01	2,08	0,03
10	23,7	-	2,03	0,00
20	23,9	0,05	2,02	0,00
30	22,1	0,25	2,01	0,00

Nota: DP é o desvio padrão.

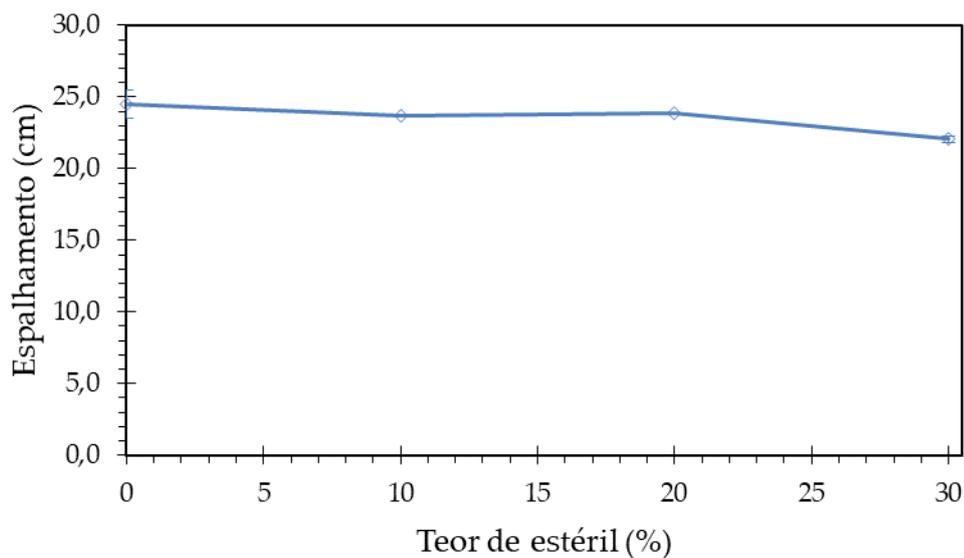


Figura 83 – Espalhamento da mistura de argamassa no estado fresco (Fonte: A autora, 2024).

A massa específica das misturas de argamassa, no estado fresco, é apresentada na Tabela 19 e na Figura 84. A análise ANOVA forneceu um F de 3,65 que foi inferior ao F_c de 6,59, portanto, os valores médios de massa específica, são estatisticamente iguais, e o uso do estéril, com menor massa específica que o cimento, não interferiu na massa específica da argamassa no estado fresco.

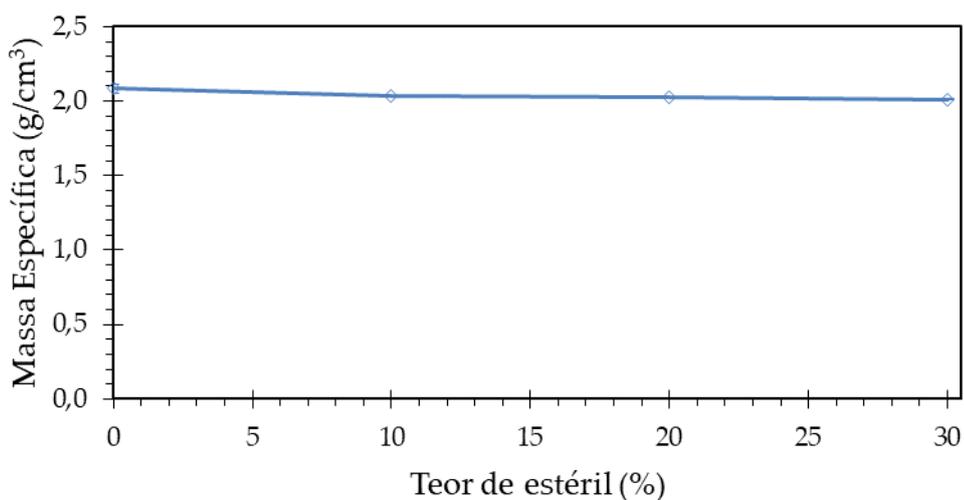


Figura 84 – Massa específica das misturas de argamassa (Fonte: A autora, 2024).

5.3.2 Propriedades das argamassas no estado endurecido

5.3.2.1 Propriedades físicas

A respeito dos ensaios realizadas nos corpos de prova de argamassa no estado endurecido, os resultados do ensaio de massa específica são apresentados na Tabela 20 e na Figura 85. A análise ANOVA, realizada na massa específica aparente seca resultou em um F de 143,17 que foi superior ao F_c de 4,07, portanto, os valores médios das massas específicas aparentes das misturas são estatisticamente diferentes. Pela análise de Tukey, tem-se que a massa específica aparente seca das argamassas com os teores 0% e 10%, 0% e 20%, 0% e 30%, 10% e 20%, 10% e 30%, 20% e 30% de estéril são diferentes. Da mesma forma, a análise estatística da massa específica real obteve um valor de F (6,01) superior ao F_c (3,41), sendo os valores estatisticamente diferentes. Pela análise de Tukey, tem-se que os teores 0% e 20%, 0% e 30%, 10% e 20%, 10% e 30% são diferentes. A massa específica real de B00 (0%) e B10 (10%) e de B20 (20%) e B30 (30%) são iguais.

Então, de uma forma geral, com o aumento do teor de estéril, a massa específica da argamassa diminui. Para o teor de 30%, a redução foi de 9% para a massa específica seca, e 4%, para a massa específica real. Portanto, a redução da massa específica da argamassa com estéril é coerente, pois o estéril possui menor massa específica que o cimento.

Tabela 20 – Resultado do ensaio de massa específica no estado endurecido da argamassa aos 28 dias (Fonte: A autora, 2024).

Teor de estéril (%)	ρ_s (g/cm ³)	DP	ρ_r (g/cm ³)	DP
0	1,86	0,01	2,65	0,01
10	1,81	0,01	2,63	0,01
20	1,74	0,03	2,55	0,04
30	1,70	0,02	2,54	0,05

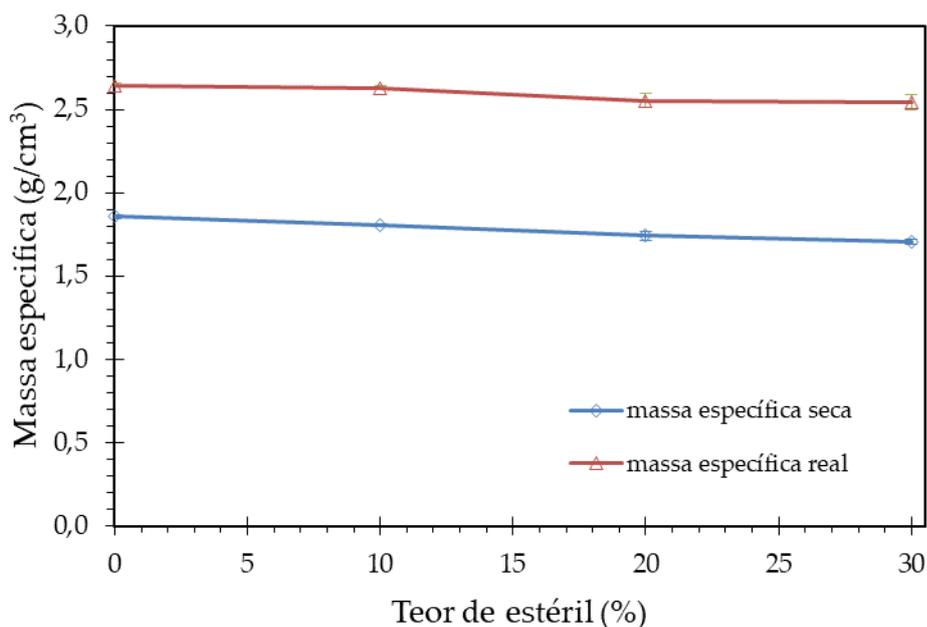


Figura 85 – Influência do teor de estéril nas massas específicas das argamassas endurecidas aos 28 dias (Fonte: A autora, 2024).

Na Tabela 21 e na Figura 86 são indicados os resultados dos ensaios de absorção de água e de índice de vazios das argamassas, aos 28 dias. A análise ANOVA indicou um valor de F de 82,82, para a absorção de água, e 24,33, para o índice de vazios, e F_c de 3,41, para a absorção de água e índice de vazios. Pela análise de Tukey, tem-se que a absorção de água e o índice de vazios das misturas com todos os teores de estéril (0% e 10%, 0% e 20%, 0% e 30%, 10% e 20%, 20% e 30% e 20% e 30%) são diferentes, com exceção do índice de vazios dos teores de 10% e 20% de estéril, que são iguais. De uma forma geral, para o teor de 30%, a absorção de água aumentou em 20%, e o índice de vazios aumentou em 10%. O aumento da porosidade da argamassa pode levar a uma redução da resistência mecânicas e da durabilidade da argamassa.

Tabela 21 – Resultado dos ensaios de absorção de água e de índice de vazios das argamassas aos 28 dias (Fonte: A autora, 2024).

Teor de estéril (%)	A	DP	I _v	DP
0	16,06	0,29	29,82	0,43
10	17,34	0,27	31,31	0,33
20	18,32	0,25	31,87	0,28
30	19,32	0,24	32,93	0,63

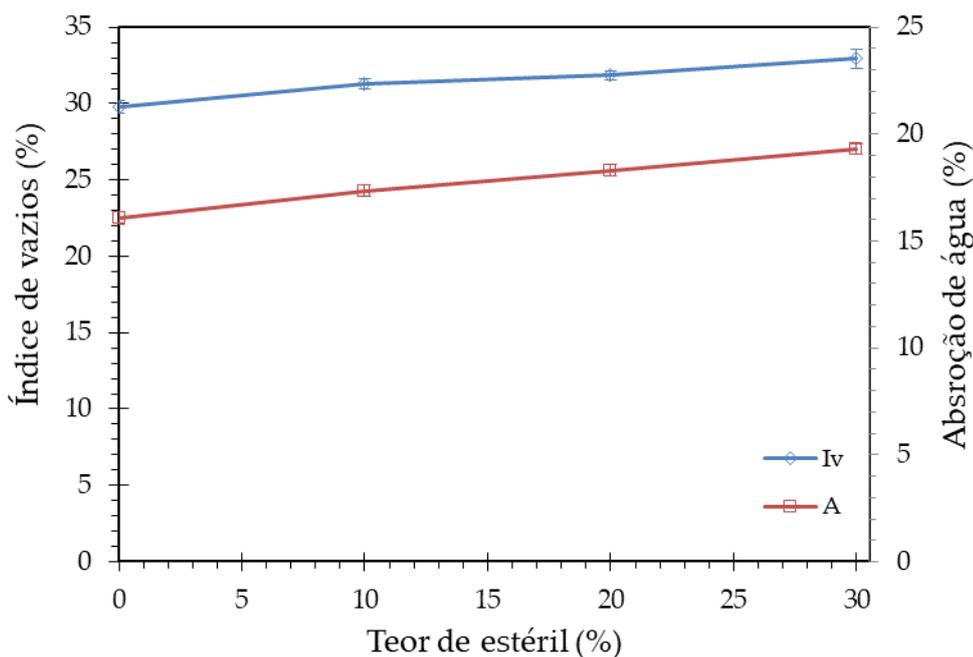


Figura 86 – Resultado dos ensaios de absorção de água e de índice de vazios das argamassas aos 28 dias (Fonte: A autora, 2024).

5.3.2.2 Propriedades mecânicas

A resistência à compressão axial das misturas com estéril parece reduzir com o aumento do teor de substituição de cimento por estéril, tanto aos 7 dias quanto aos 28 dias, conforme é indicado na Tabela 22 e na Figura 87. A análise ANOVA da resistência à compressão, tanto aos 7 dias, quanto aos 28 dias, forneceram valores estaticamente diferentes, com F de 8,61 (7 dias) e de 38,32 (28 dias) e F_c de 3,71 (7 dias) e de 4,07 (28 dias). Pela análise de Tukey, aos 7 dias tem-se que a resistência à compressão das argamassas com os teores de 0% e 20%, 0% e 30%, 10% e 20%, 10% e 30% são diferentes, e a resistência à compressão das misturas com 0% e 10%,

20% e 30% são iguais. Para 28 dias, observa-se uma diferença nos valores da resistência à compressão de todas as misturas.

Tabela 22 – Resultados do ensaio de resistência à compressão axial das argamassas aos 7 e 28 dias e de módulo de elasticidade ao 28 dias (Fonte: A autora, 2024).

Teor de estéril (%)	Resistência à compressão (MPa)				Módulo de elasticidade (GPa)	
	7 dias		28 dias		28 dias	
	f_c	DP	f_c	DP	E	DP
0	52,64	2,21	67,28	1,73	20,64	0,58
10	51,91	2,15	61,16	1,35	20,12	2,56
20	44,88	2,47	52,88	1,10	19,67	0,61
30	43,40	3,24	47,30	2,93	18,76	0,43

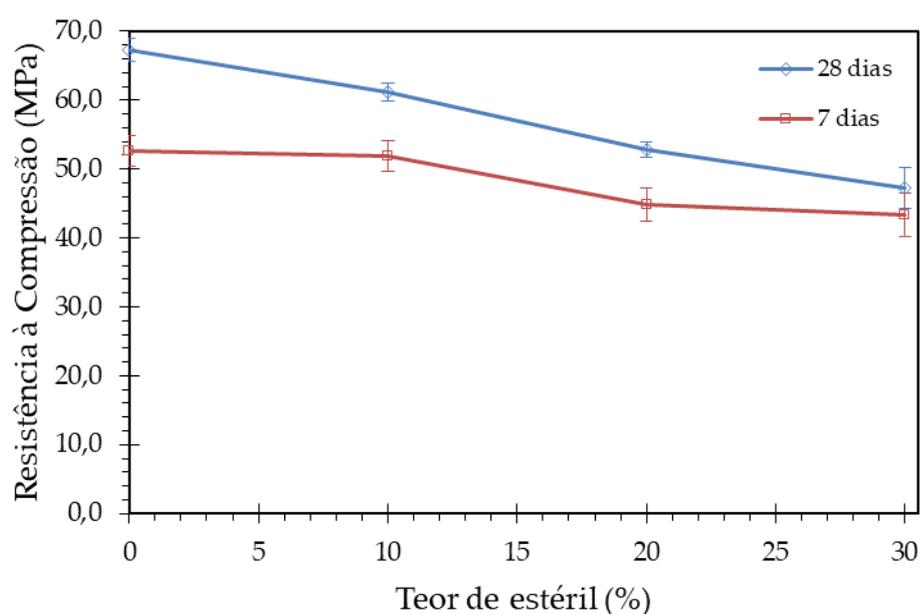


Figura 87 – Resistência à compressão axial das argamassas aos 7 e 28 dias em função do teor de estéril (Fonte: A autora, 2024).

Quanto maior a substituição de cimento por estéril, menor a quantidade de cimento e a quantidade de produtos de hidratação, e conseqüentemente, menor a resistência à compressão. Para o teor de 30% de substituição, a redução na resistência foi de 18%, aos 7 dias, e de 30%, aos 28 dias, quando comparada à mistura de referência.

Avaliando a resistência à compressão axial ao longo do tempo, os ganhos de resistência das argamassas aos 28 dias, comparados aos 7 dias, foram de 78% (B00), 85% (B10), 85% (B20) e 92% (B30). Esse comportamento indica uma crescente aceleração da reação de hidratação causada pelo estéril nas misturas.

A aplicação do estéril como filler proporciona o efeito de diluição e de nucleação nas primeiras idades da matriz cimentícia. Segundo Wang et al. (2018), o efeito de diluição tende a diminuir a resistência da mistura, pois a substituição parcial do cimento pelo filler reduz a quantidade de cimento na matriz e, conseqüentemente, os produtos de hidratação. Além disso, com a mesma relação água/(cimento + filler), uma vez que o filler não possui propriedades cimentícias ou pozolânica, a sua substituição por cimento aumenta a quantidade de água livre para reagir com as partículas de cimento. Segundo vários autores (MARTIN *et al.*, 2006; SCHUTTER *et al.*, 2011; DESCHNER *et al.*, 2012; SCRIVENER *et al.*, 2015b), é possível que o grau de hidratação do cimento aumente com o efeito diluição, pois a disputa pela água é menor. Johna *et al.* (2018) cita que é possível compensar o efeito da diluição aumentando a finura do cimento, ou reduzindo a relação água/cimento.

O efeito de nucleação ocorreu devido a superfície específica do estéril proporcionar pontos para precipitação de produtos da hidratação dos aluminatos, acelerando a reação de hidratação nas primeiras idades e melhorando o grau de hidratação do cimento (BEZERRA *et al.*, 2021; WANG *et al.*, 2018; SCRIVENER *et al.*, 2015a). Scrivener *et al.* (2015a) e Lothenbach *et al.* (2011) também ressaltam que quando o filler substitui os grãos de cimentos, há relativamente mais espaço disponível para a formação dos hidratos das fases do clínquer, e a relação água/clínquer é maior, acelerando a reação de hidratação nas idades iniciais.

A variação do módulo de elasticidade dos corpos de prova de argamassa com o teor de estéril é mostrada na Figura 88 e na Tabela 22. A análise ANOVA, indicou que as médias foram estatisticamente iguais, tendo $F(0,90)$ inferior à $F_c(3,71)$. Portanto, não é possível observar a influência do estéril no módulo de elasticidade da argamassa, diferentemente da resistência à compressão axial que há uma influência maior do uso do estéril.

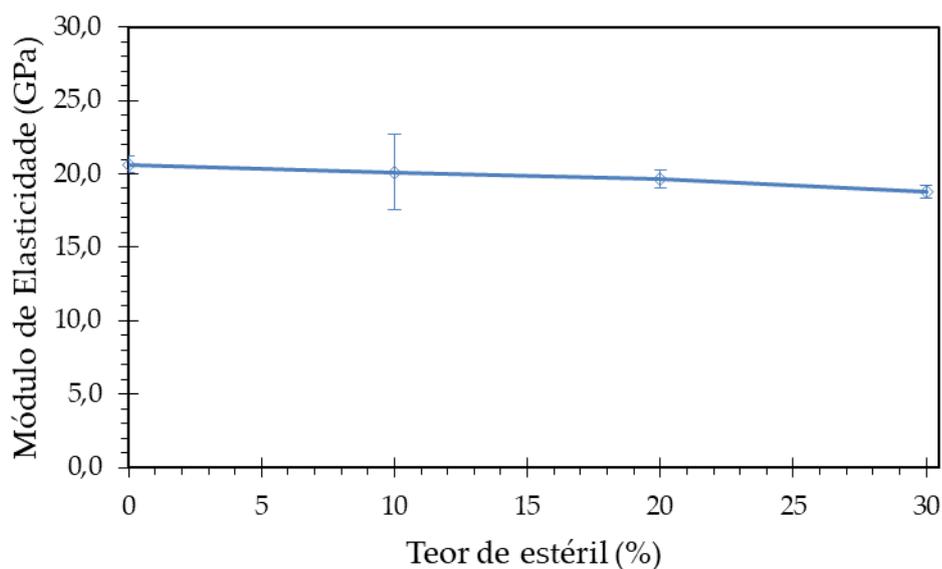


Figura 88 – Módulo de elasticidade das argamassas aos 28 dias (Fonte: A autora, 2024).

Em termos de resistência à tração por compressão diametral (Tabela 23 e na Figura 89), a análise ANOVA indicou que as médias de resistência à tração por compressão diametral foram estatisticamente iguais, tendo $F (1,08)$ inferior à $F_c (3,71)$.

Tabela 23 – Resultados do ensaio de resistência à tração por compressão diametral aos 28 dias (Fonte: A autora, 2024).

Teor de estéril (%)	$f_{ct,sp}$ (MPa)	DP
0	4,72	1,33
10	4,13	0,50
20	3,53	0,21
30	3,65	0,24

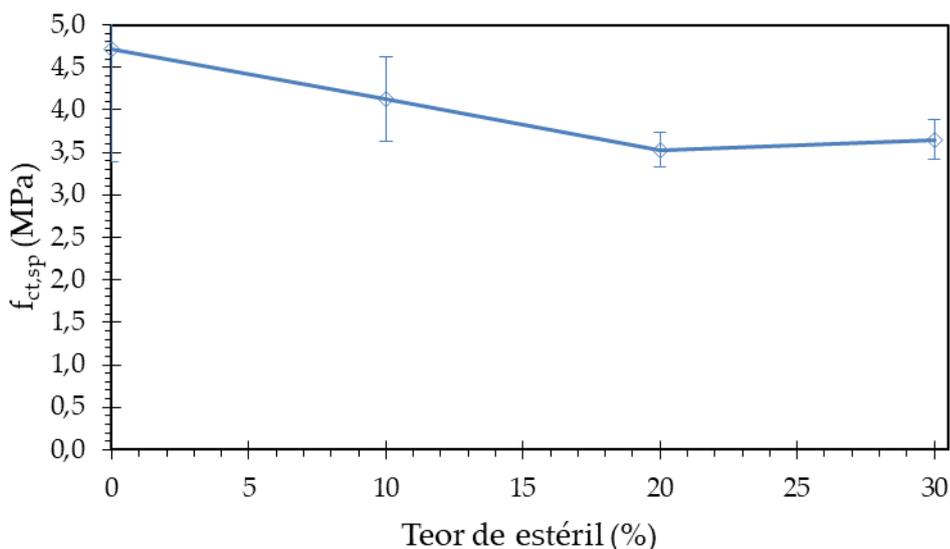


Figura 89 – Resistência à tração por compressão diametral das argamassas aos 28 dias (Fonte: A autora, 2024).

Em termos de tenacidade à fratura das argamassas (Tabela 24 e Figura 90), à análise ANOVA indicou que, tanto a tenacidade à fratura, quanto à energia de fratura resultaram que as médias são estatisticamente diferentes, tendo F (6,37 e 4,43, respectivamente) superiores a F_c (4,07). Por ANOVA e Tukey, conclui-se que a tenacidade a fratura das argamassas com os teores de estéril de 0% e 20%, 0% e 30%, 10% e 20% e 10% e 30% são diferentes, sendo iguais apenas para os teores de 0% e 10% e de 20% e 30% de estéril. E apenas a energia de fratura das argamassas com 0% e 20% e 10% e 20% são diferentes, desta forma, a energia de fratura das argamassas com os teores de estéril de 0% e 10%, 0% e 30%, 10% e 30% e 20% e 30% são iguais. Verifica-se que o aumento do teor de estéril na mistura de argamassa, leva a uma menor tenacidade e energia a fratura das argamassas. Segundo Santos (2005), a energia de fratura é uma medida da quantidade total de energia necessária para propagar uma fissura em um material. Mai e Cotterell (1985) correlacionam a menor tenacidade à fratura com a maior porosidade da argamassa e Costa (2024) explica que quanto maior a porosidade na matriz, maior a probabilidade de haver locais propícios para o surgimento de fissuras e a propagação delas. Portanto, uma maior porosidade tende a reduzir a tenacidade à fratura do material, pois enfraquece sua capacidade de resistir à propagação de fissuras. Logo, os resultados obtidos de

tenacidade são coerentes com as propriedades físicas da argamassa, ou seja, quanto maior o índice de vazios da argamassa, menor a tenacidade da argamassa.

Tabela 24 – Resultado do ensaio de tenacidade à fratura e energia de fratura das argamassas (Fonte: A autora, 2024).

Teor de estéril (%)	K_m (MPa.m ^{1/2})	DP	J_{tip} (J/m ²)	DP
0	0,52	0,02	13,02	0,89
10	0,53	0,01	13,91	0,60
20	0,44	0,00	10,04	0,10
30	0,43	0,05	9,92	2,52

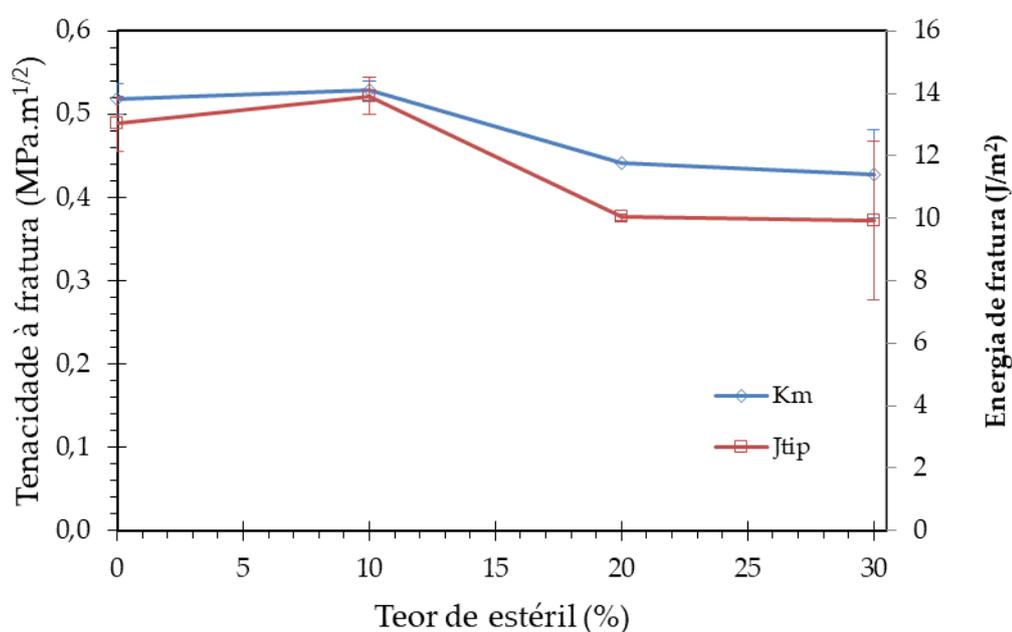


Figura 90 – Influência do teor de estéril na tenacidade à fratura e energia de fratura das argamassas (Fonte: A autora, 2024).

Ainda, a tenacidade à fratura é correlacionada à resistência à compressão das argamassas na Figura 91, através de uma equação de ajuste linear $K_m = 0,0053 \cdot f_c + 0,18$ com coeficiente de correlação de 0,85, indicando um adequado ajuste da curva. Verifica-se que quanto maior a resistência a compressão da argamassa, maior a tenacidade a fratura do material, o que está relacionado a uma menor porosidade da matriz de argamassa.

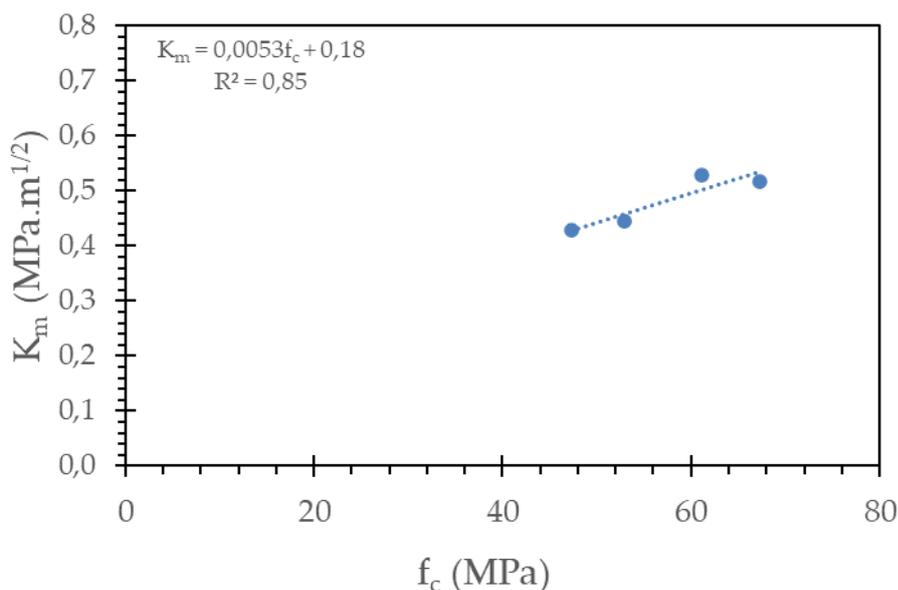


Figura 91 – Correlação da resistência à compressão (f_c) com a tenacidade à fratura (K_m) das argamassas (Fonte: A autora, 2024).

5.4 Conclusão

A aplicação do estéril em substituição ao cimento nas misturas de argamassa se mostrou promissora. As misturas da argamassa no estado fresco não foram afetadas pela substituição de cimento por estéril, não sendo necessário o uso de um superplastificante.

Em termos de propriedades no estado endurecido, e com base na análise estatística das propriedades físicas, conclui-se que o estéril influencia na massa específica, absorção de água e índice de vazios das argamassas.

A respeito das propriedades mecânicas, a resistência à compressão axial das misturas com estéril reduziu com o aumento do teor de substituição de cimento por estéril, tanto aos 7 dias, quanto aos 28 dias, exceto para o teor de 10% aos 7 dias. A tenacidade à fratura e a energia de fratura da matriz também foram afetadas pelo uso do estéril principalmente no teor de 20% e 30% de estéril. No entanto, a incorporação de estéril não influenciou o módulo de elasticidade e a resistência à tração por compressão diametral das argamassas.

Portanto, os resultados dos ensaios em argamassas apontam para a utilização do estéril na forma de adição mineral do tipo fíler, sendo observado o efeito de diluição

e de nucleação na matriz cimentícia nas primeiras idades, com uma crescente aceleração da reação de hidratação causada pelo aumento do teor de estéril nas misturas.

6 DESENVOLVIMENTO DE COMPÓSITOS CIMENTÍCIOS DO TIPO ECC, COM O USO DO ESTÉRIL DE MINERAÇÃO

6.1 Misturas dos compósitos cimentícios

Para a produção do ECC, foram utilizados o estéril beneficiado, cimento CP V-ARI, areia fina, com diâmetro máximo dos grãos de 300 μm , fibra de PVA de 8 mm, superplastificante e água. A descrição destes materiais foi apresentada no item 3.1 e a caracterização do estéril e do cimento no Item 4.

Inicialmente foi realizada a determinação da dosagem do superplastificante, que seria utilizado nas misturas, visando obter a trabalhabilidade adequada para a adição das fibras, com base na NBR 7681-2 (2013), e através do ensaio do funil de Marsh. O ensaio consiste na verificação da fluidez da mistura por meio da medição do tempo necessário para o escoamento de 1 litro de mistura pelo funil de Marsh. Neste trabalho foi utilizada uma argamassa composta por cimento, estéril e areia, de acordo com as proporções na Tabela 25. Na Figura 92 é ilustrado a realização do ensaio.

Tabela 25 – Proporções de materiais (Fonte: A autora, 2024).

Mistura	cimento (c)	estéril (e)	$\frac{\text{areia}}{c + e}$	$\frac{\text{água}}{c + e}$	$\frac{SP}{c + e}$
C00	1,00	0,00	0,36	0,40	0,70
C00	1,00	0,00	0,36	0,40	0,80
C20	0,80	0,20	0,36	0,40	0,50
C20	0,80	0,20	0,36	0,40	0,70
C20	0,80	0,20	0,36	0,40	0,80
C30-1	0,70	0,30	0,36	0,28	0,90
C30-1	0,70	0,30	0,36	0,28	1,10
C30-1	0,70	0,30	0,36	0,32	1,30



Figura 92 – Realização do ensaio do funil de Marsh (Fonte: A autora, 2024).

Os resultados dos ensaios de funil de Marsh são mostrados na Tabela 26. A quantidade de superplastificante adotada em massa foi de 0,80 %, para a mistura C00, de 0,70% para a C20, de 1,30% para C30-1. Estes teores foram escolhidos em função do menor tempo de escoamento no funil e valores do espalhamento, os quais deveriam ser maiores que 300mm, de forma a proporcionar uma adequada consistência para o recebimento das fibras. Os teores são descritos em função do teor total do superplastificante (água mais sólidos). Vale destacar que, para a mistura C30-1, apesar do tempo de escoamento ser alto para a relação $SP/(c+e)$ de 1,30, o espalhamento da mistura na mesa de consistência foi superior a 300 mm, semelhante as outras misturas.

Tabela 26 – Resultado do ensaio do funil de Marsh (Fonte: A autora, 2024).

Mistura	$\frac{SP}{c+e}$ (em %)	tempo	espalhamento (mm)
C00	0,70	Não passou no funil	325,0
C00	0,80	56 segundos	338,7
C20	0,50	Não passou no funil	276,5
C20	0,70	49 segundos	300,0
C20	0,80	58 segundos	291,7
C30-1	0,90	Não passou no funil	-
C30-1	1,10	Não passou no funil	-
C30-1	1,30	6 minutos	344,3

Foram fabricadas 3 misturas de ECC, as quais variavam o teor de estéril utilizado em substituição (em massa) do cimento. Os teores de estéril de 20% e 30%, foram escolhidos visando avaliar a influência de maiores substituições de cimento por estéril, de forma a tornar o ECC mais sustentável, uma vez que o mesmo necessita de um elevado consumo de cimento para atingir as propriedades desejadas, e com isso, gerando um impacto negativo ao meio ambiente, devido a emissões de gases poluentes como o gás carbônico. Da mesma forma que para a argamassa, foi produzida uma mistura de referência (somente cimento). No estudo foram avaliados dois teores de água/(cimento+estéril), de 0,40, de forma a se comparar os resultados com a matriz de argamassa do Item 5, e de 0,32, para a mistura com 30% de estéril, uma vez que a consistência da mistura B30 não foi significativamente reduzida. A proporção de material cimentício, areia e água nas misturas é apresentada na Tabela 27. Assim, a mistura C00 é a mistura de referência, com somente cimento, a mistura C20 é a mistura com 20% de estéril e 80% de cimento, e a mistura C30 é a mistura com 30% de estéril e 70% de cimento. A quantidade de cada material, em kg/m³, utilizado para a produção das misturas de ECC é indicada na Tabela 28.

Há de se destacar que o teor de superplastificante nas misturas variou de forma a obter uma mistura adequada para o uso de fibras.

Tabela 27 – Proporções de materiais (Fonte: A autora, 2024).

Mistura	Teor de estéril (%)	cimento	estéril	$\frac{areia}{c + e}$	$\frac{água}{c + e}$	$\frac{SP}{c + e}$	Fibras (%)
C00	0	1,00	0,00	0,36	0,40	0,80	2,00
C20	20	0,80	0,20	0,36	0,40	0,70	2,00
C30	30	0,70	0,30	0,36	0,40	0,75	2,00
C30-1	30	0,70	0,30	0,36	0,32	1,30	2,00

Nota: c + e – cimento + estéril e SP – superplastificante.

Tabela 28 – Quantidades de materiais, em kg/m³, nas misturas de compósitos (Fonte: A autora, 2024).

Mistura	Teor de estéril (em %)	Quantidade (kg/m ³)					
		cimento	estéril	areia	água	SP	fibras
C00	0	1161,39	0,00	418,10	464,56	9,29	26,00
C20	20	920,50	230,12	414,22	460,25	8,05	26,00
C30	30	801,72	343,59	412,31	458,12	8,59	26,00
C30-1	30	882,58	378,25	453,90	403,47	16,39	26,00

Nota: SP – superplastificante.

6.2 Produção dos corpos de prova de compósitos

Quanto aos corpos de prova de ECC, utilizou-se três tipos de forma, as formas para corpos de prova cilíndricos (igual da argamassa), as formas retangulares com dimensões de 400 x 60 x 12,5 mm e as formas de formato de halter, com dimensões de 30 x 30 x 330 mm (largura na parte central x espessura x comprimento total do corpo de prova). Os corpos de prova cilíndricos foram utilizados para os ensaios de resistência à compressão axial, módulo de elasticidade e massa específica do ECC no estado endurecido. Os corpos de prova retangulares foram utilizados para o ensaio de flexão e os corpos de provas em formato de halter para ensaio de tração.

As formas utilizadas para produção dos corpos de prova são representadas na Figura 93. Mais detalhes sobre estes ensaios são apresentados no Item 3.2.4.

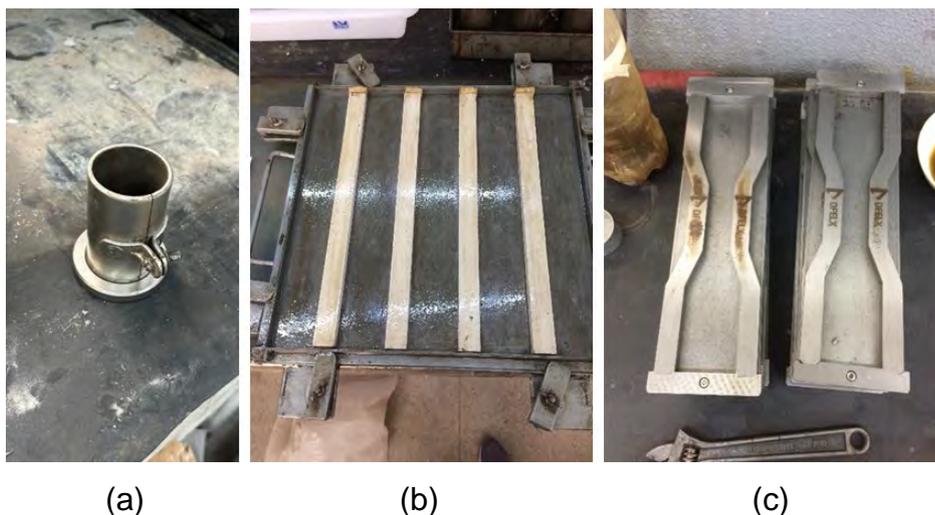


Figura 93 – Formas utilizadas para a produção dos corpos de prova: (a) cilíndrica, (b) retangulares e (c) em formato de halter (Fonte: A autora, 2024).

As misturas de ECC foram produzidas na mesma argamassadeira utilizada para a fabricação das argamassas.

Os processos de produção das misturas de argamassa e do ECC foram semelhantes com diferença apenas na adição de fibras e de superplastificante para o ECC. Há de se destacar que, no caso do ECC, foi reservada uma quantidade de água de aproximadamente de 10% do volume total para ser misturado com o superplastificante, a qual foi misturada ao final do processo de produção da matriz. Sendo mantido o tempo de mistura de pelo menos 5 minutos do ECC com adição do superplastificante de forma a garantir seu tempo de ativação. Em seguida, as fibras foram adicionadas à mistura de forma lenta e gradual de modo a permitir a distribuição uniforme das fibras e não formar novelos ou grumos. O processo de misturas das fibras com os demais materiais na argamassadeira levou em média 3 minutos. Na Figura 94 é apresentada a produção dos compósitos. Observa-se que o estéril alterou a cor da mistura no estado fresco, tornando-a mais avermelhada em ambos os casos, o que pode ser justificado pelo fato do resíduo ser proveniente do minério de ferro. Por fim, na Figura 95 é ilustrada uma comparação da consistência da mistura C20, antes e após a aplicação das fibras de PVA no teor de 2%.



Figura 94 – Produção das misturas – Comparação das misturas de ECC (a) sem e (b) com adição de 30% de estéril (Fonte: A autora, 2024).



Figura 95 – Aspecto da mistura C20 (a) antes e (b) depois da aplicação das fibras (Fonte: A autora, 2024).

Ainda com a mistura no estado fresco, foram realizados os ensaios de espalhamento e de massa específica, que são descritos no item 3.2.4.1. Logo depois, a mistura fresca foi colocada nos moldes. O adensamento das misturas de ECC, foi realizado com a aplicação de 30 golpes em 3 camadas. A moldagem e o adensamento dos corpos de prova são ilustrados na Figura 96.

O processo de produção dos ECCs e moldagem foram realizados em ambiente climatizado ($23^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$). A cura nas primeiras 24 horas foi realizada em ambiente úmido (Figura 97). Após 24 horas da produção dos ECCs, os corpos de prova foram desmoldados, identificados e imersos em tanque de água saturado com hidróxido de cálcio, para a cura final até as datas dos ensaios experimentais (Figura 98).

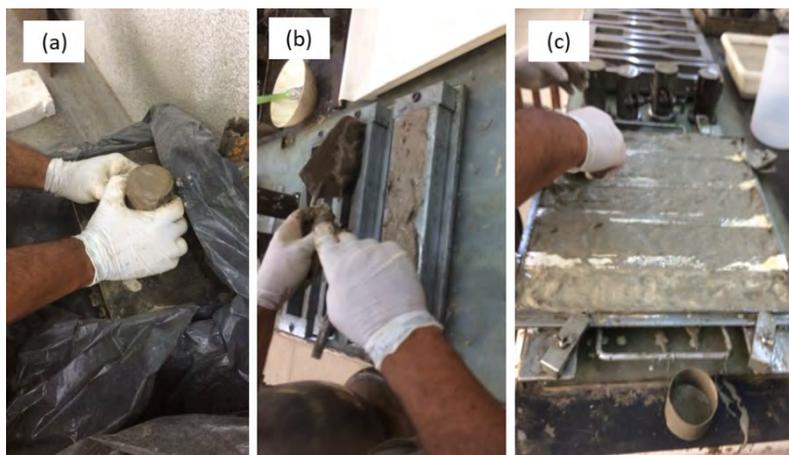


Figura 96 – Moldagem dos corpos de prova – (a) adensamento do corpo de prova, (b) preenchimento das formas e (c) alisamento dos corpos de prova (Fonte: A autora, 2024).

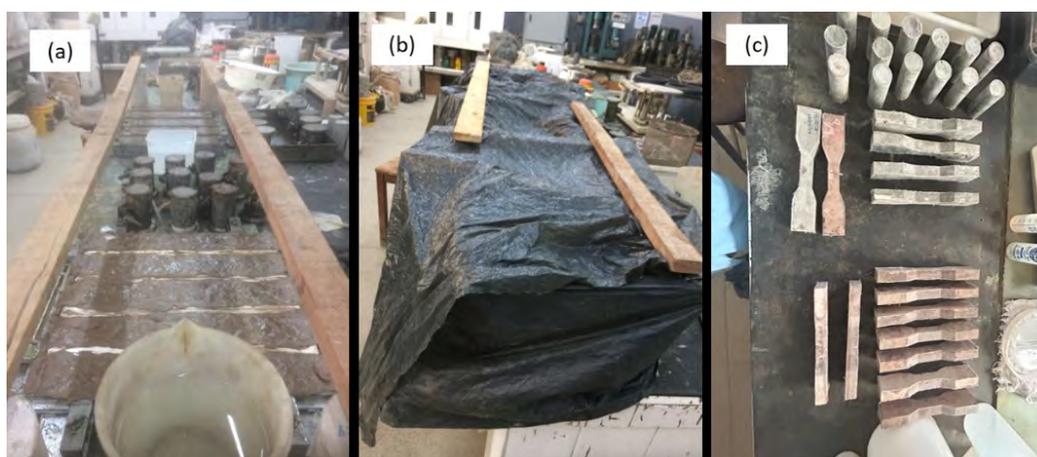


Figura 97 – Primeiras 24 horas após a produção das misturas – (a) Preparação para a cura dos corpos de prova em ambiente úmido, (b) isolamento da região para manter a umidade ambiente, (c) desforma dos corpos de prova (Fonte: A autora, 2024).



Figura 98 – Cura dos corpos de prova imersos em água (Fonte: A autora, 2024).

6.3 Propriedades físicas e mecânicas dos compósitos

6.3.1 Propriedades no estado fresco

Em relação aos ensaios no ECC no estado fresco, o ensaio de consistência (Tabela 29 e Figura 99) indicou que a trabalhabilidade da mistura foi afetada pela substituição de cimento por estéril apenas para o teor de 20% de estéril. Em comparação com a mistura de referência, as variações no espalhamento das misturas foram de 12% (incremento) para C20, 2% (incremento) para C30 e -2% (redução) para C30-1. Há de se destacar que o teor de superplastificante variou em cada mistura de forma a obter uma mistura adequada para o ensaio do funil de Marsh, sendo a mistura C20 com o menor teor de superplastificante (0,70% em massa – ver Tabela 27), seguidas das misturas C30 (0,75% em massa – ver Tabela 27), C00 (0,80% em massa – ver Tabela 27) e C30-1 (1,30% em massa – ver Tabela 27).

Portanto, era esperado que a mistura C20 apresentasse menor espalhamento em relação as demais misturas, visto que a mistura utilizou uma menor quantidade de superplastificante. Assim como para a mistura C30-1, que possuía uma menor relação água/(cimento+estéril) comparada as demais misturas. Para todos os teores avaliados as misturas foram trabalháveis.

Tabela 29 – Resultado dos ensaios de consistência e de massa específica das misturas de ECCs no estado fresco (Fonte: A autora, 2024).

Mistura	Teor de estéril (%)	a/(c+e)	Espalhamento (mm)	ρ médio (g/cm ³)
C00	0	0,40	296,7	2,01
C20	20	0,40	338,7	2,11
C30	30	0,40	303,3	1,99
C30-1	30	0,32	288,0	2,06

Nota: a/(c+e) = água/(cimento + estéril).

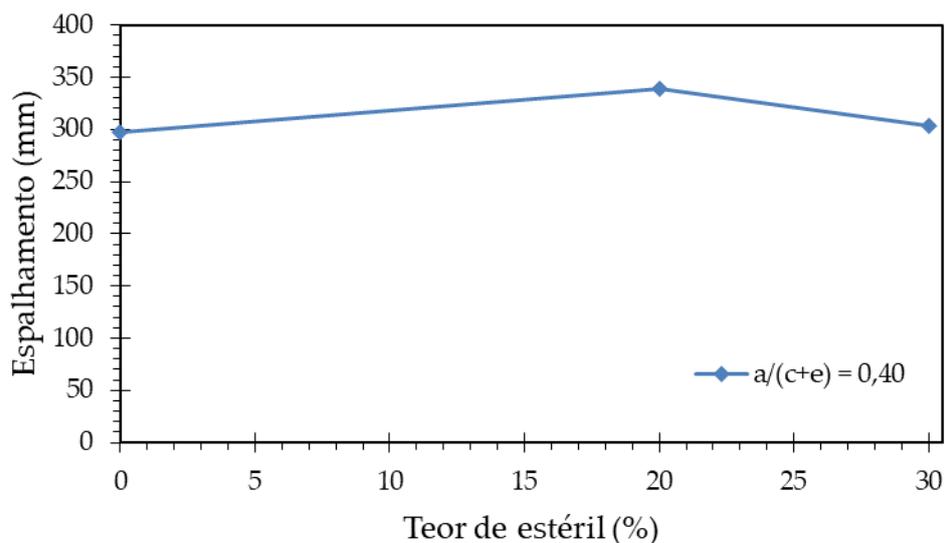


Figura 99 – Espalhamento das misturas de ECCs no estado fresco (Fonte: A autora, 2024).

A massa específica das misturas de ECC é apresentada na Tabela 29 e na Figura 100. Em comparação com a mistura C00, houve um incremento na massa específica das misturas C20 de 5%, e uma redução de 1% para a mistura C30. Para a mistura C30-1, houve um aumento de 3% em comparação a mistura C30.

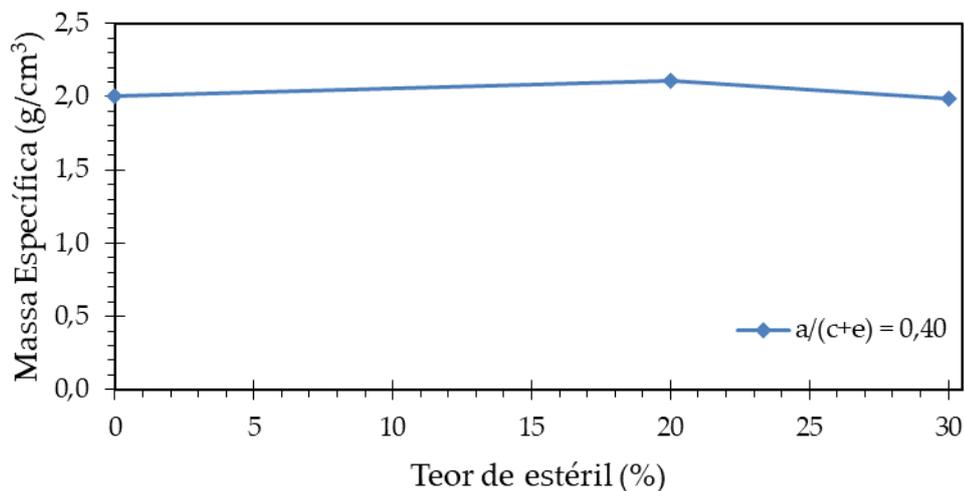


Figura 100 – Massa específica das misturas de ECCs (Fonte: A autora, 2024).

6.3.2 Propriedades dos compósitos no estado endurecido

6.3.2.1 Propriedades físicas

A respeito dos ensaios realizadas nos corpos de prova de ECC no estado endurecido, os resultados do ensaio de massa específica são apresentados na Tabela 30 e na Figura 101. Na análise ANOVA, as massas específicas aparente seca e real das misturas C00, C20 e C30 resultaram em um F de 89,52 (seca) e de 55,25 (real) que foram superiores ao F_c de 4,07 (seca e real), portanto, os valores médios da massa específica do ECC são estatisticamente diferentes. Pela análise de Tukey, observa-se que a massa específica das misturas C00 e C20, C00 e C30, C20 e C30 são diferentes, com exceção da massa específica real das misturas C00 e C30, que são iguais. A redução do teor de água no compósito C30 para C30-1, pela análise ANOVA, implicou que as massas específicas aparentes são estatisticamente diferentes ($F= 96,05$ e $F_c=7,71$) e as massas específicas reais são estatisticamente iguais ($F= 1,93$ e $F_c=7,71$).

Portanto, com o aumento do teor de estéril, a massa específica do ECC diminuiu. As reduções foram de 11% (C20) e 5% (C30), para a massa específica aparente seca, e de 10% (C20) para a massa específica real, quando comparadas com a referência (C00). Destaca-se que era esperado que a mistura C20 apresentasse maior massa específica (seca e real) que a mistura C30. Ao reduzir a quantidade de água da mistura com o teor de estéril de 30% de 0,40 para 0,32, observou-se um incremento no valor da massa específica aparente de 10%.

Tabela 30 – Resultado do ensaio de massa específica no estado endurecido do ECC aos 28 dias (Fonte: A autora, 2024).

Mistura	$a/(c+e)$	Teor de estéril (%)	ρ_s (g/cm ³)	DP	ρ_r (g/cm ³)	DP
C00	0,40	0	1,84	0,01	2,58	0,01
C20	0,40	20	1,64	0,03	2,33	0,04
C30	0,40	30	1,75	0,02	2,59	0,03
C30-1	0,32	30	1,92	0,01	2,62	0,01

Nota: $a/(c+e)$ = água/(cimento + estéril)

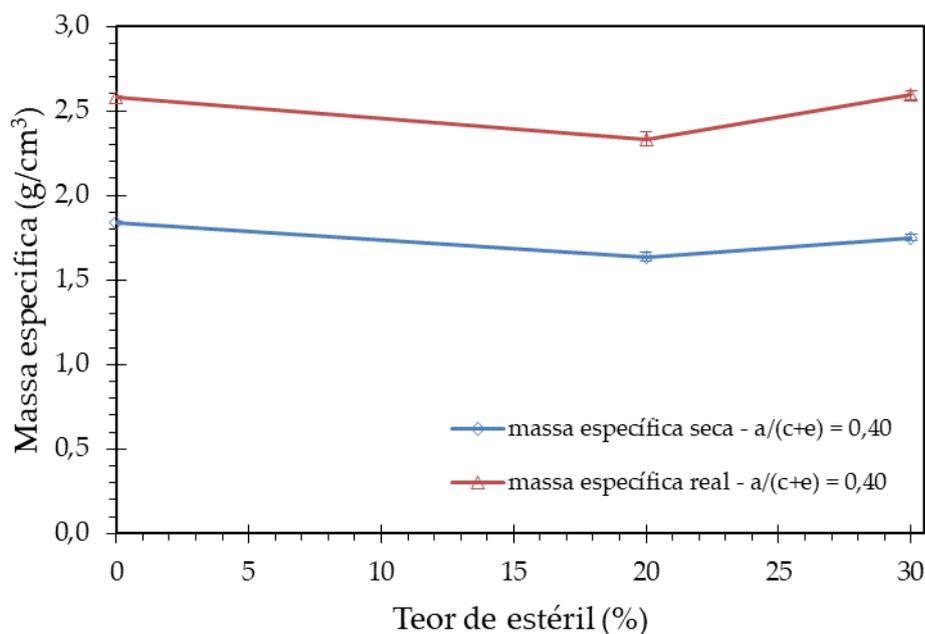


Figura 101 – Resultado do ensaio de massa específica no estado endurecido do ECC aos 28 dias (Fonte: A autora, 2024).

Na Tabela 31 e na Figura 102 são indicados os resultados dos ensaios de absorção de água e de índice de vazios dos ECCs aos 28 dias. Quanto a análise ANOVA, tanto a absorção de água quanto o índice de vazios das misturas C00, C20 e C30, são estatisticamente diferentes, com F de 109,79 (A) e 103,28 (Iv) e F_c de 4,07 (A e Iv). A análise de Tukey, para ambos os casos, indicou que todas as misturas (C00 e C20, C00 e C30, C20 e C30) são diferentes com exceção da absorção de água das misturas C20 e C30, ou seja, o uso de estéril influenciou na absorção de água e no índice de vazios do ECC. Ao reduzir a quantidade de água no compósito, de C30 para C30-1, a análise ANOVA indicou que o índice de vazios e absorção de água das misturas são estatisticamente diferentes, com F de 151,33 (A) e de 172,81 (Iv) e F_c de 7,71 (A e Iv).

Analisando as misturas com o mesmo teor de água ($a/(c+e) = 0,40$), percebe-se que tanto a absorção de água, quanto o índice de vazios dos ECCs aumentaram com o aumento do teor de substituição de cimento por estéril, em relação à mistura de referência. Para a absorção de água, esse aumento foi de 17% (C20) e 19% (C30), e para o índice de vazios do ECC foi 4% (C20) e 13% (C30). Ao reduzir a quantidade de água da mistura, com o teor de estéril de 30%, de $a/(c+e)$ de 0,40 para 0,32, houve um decréscimo na absorção de água e do índice de vazios do ECC de 25% e 18%,

respectivamente. O índice de vazios e a absorção de água do ECC influenciam inversamente nas propriedades mecânicas do ECC. Da mesma forma, a relação água/material cimentício é inversamente proporcional a resistência mecânica do compósito.

Tabela 31 – Resultado dos ensaios de absorção de água e de índice de vazios dos ECCs aos 28 dias (Fonte: A autora, 2024).

Mistura	$a/(c+e)$	Teor de estéril (%)	A	DP	I_v	DP
C00	0,40	0	15,61	0,10	28,70	0,24
C20	0,40	20	18,23	0,25	29,84	0,08
C30	0,40	30	18,55	0,48	32,46	0,56
C30-1	0,32	30	13,95	0,21	26,76	0,25

Nota: $a/(c+e)$ = água/(cimento + estéril)

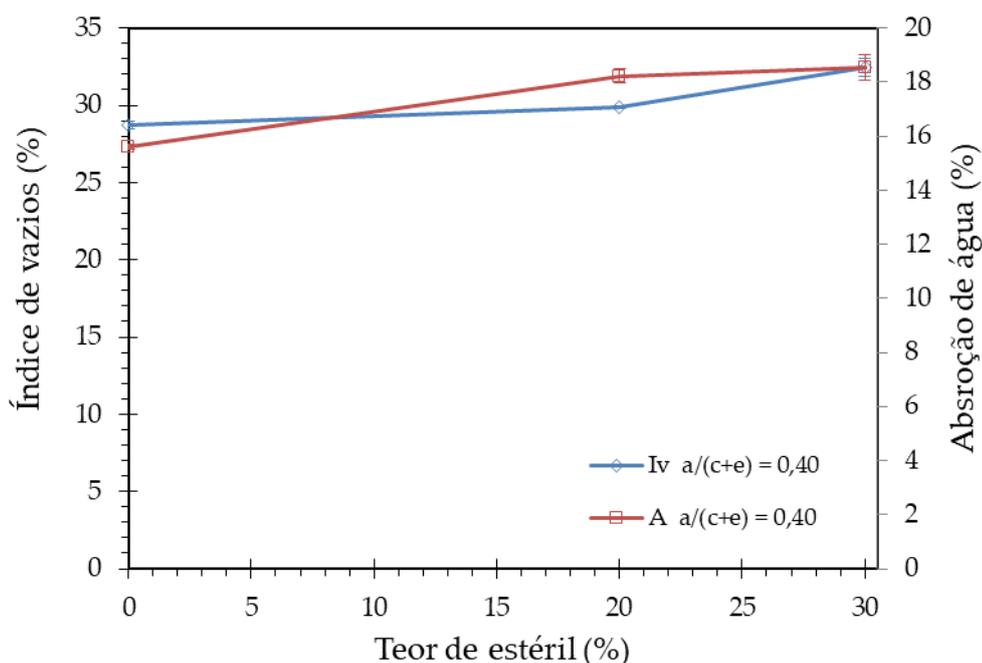


Figura 102 – Resultado dos ensaios de absorção de água e de índice de vazios dos ECCs aos 28 dias (Fonte: A autora, 2024).

6.3.2.2 Propriedades mecânicas

A variação da resistência à compressão axial das misturas com o teor de estéril, aos 28 dias, é indicada na Tabela 32 e na Figura 103. A análise ANOVA indicou um F

de 106,33 que foi superior ao F_c de 4,74, portanto, os valores médios de resistência à compressão das mistura de ECC com até 30% de estéril em substituição ao cimento (C00, C20 e C30) são estatisticamente diferentes. Pela análise de Tukey, tem-se que a resistência à compressão das misturas C00 e C20, C00 e C30, C20 e C30 são diferentes. Da mesma forma, a análise ANOVA, forneceu valores estatisticamente diferentes quanto o teor de água foi reduzido de 0,40 (C30) para 0,32 (C30-1), com $F = 68,51$ e $F_c = 6,61$.

De forma geral, a resistência à compressão axial das misturas com estéril aos 28 dias reduziu com o aumento do teor de substituição de cimento por estéril. Para os teores de 20% e 30% de substituição, as reduções na resistência foram de 25% (C20) e 43% (C30) quando comparada à mistura de referência. Ao reduzir a quantidade de água da mistura C30-1 ($a/(c+e) = 0,32$), foi observado um aumento de resistência de 32% em relação à mistura C30.

Tabela 32 – Resultados do ensaio de resistência à compressão axial e módulo de elasticidade dos ECCs aos 28 dias (Fonte: A autora, 2024).

Mistura	$a/(c+e)$	Teor de estéril (%)	Resistência à compressão (MPa)		Módulo de elasticidade (GPa)	
			f_c	DP	E	DP
C00	0,40	0	79,31	2,91	19,50	0,51
C20	0,40	10	59,79	2,06	19,82	0,82
C30	0,40	20	44,88	2,70	16,90	0,29
C30-1	0,32	30	59,16	0,95	22,11	0,52

Nota: $a/(c+e) = \text{água}/(\text{cimento} + \text{estéril})$

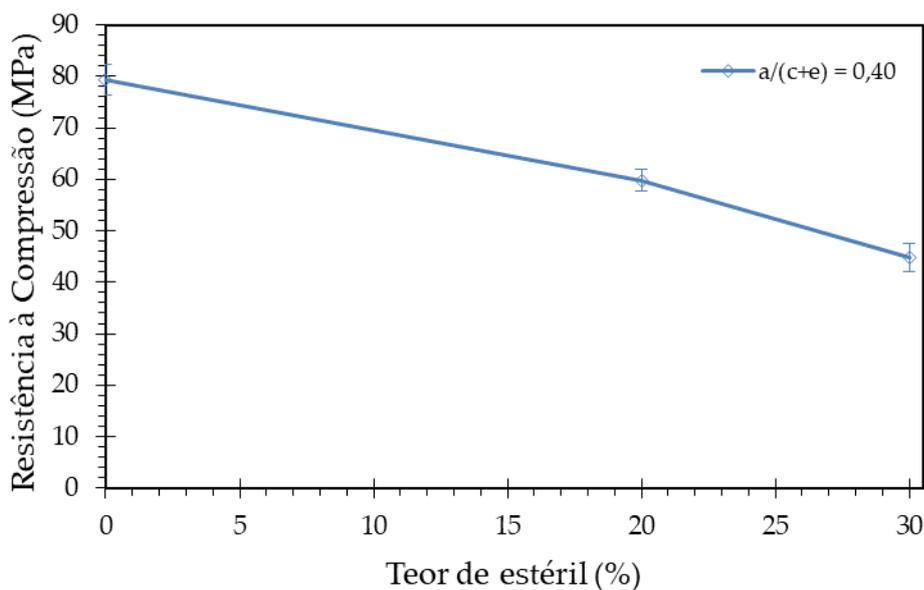


Figura 103 – Resistência à compressão axial dos ECCs aos 28 dias (Fonte: A autora, 2024).

Huang *et al.* (2013), também verificou uma redução da resistência à compressão do ECC com a utilização do rejeito de minério de ferro em substituição ao cimento e justificou o ocorrido pelo fato da redução de produtos de hidratação do cimento. Como foi verificado nos itens anteriores (ver 4.4 e 5.4), o estéril foi utilizado como uma adição mineral do tipo filler, sendo assim, ao substituir o cimento por estéril, reduz-se a quantidade de produtos resultantes da hidratação do cimento e consequentemente a resistência à compressão da mistura, uma vez que o estéril não é um material pozolânico ou cimentante.

Ainda, vale destacar que os valores de resistência à compressão das misturas de ECC (C00, C20, C30, C30-1) são compatíveis com a faixa de resistência à compressão estimada por Li (2019) para o ECC de 30 MPa a 80MPa.

O resultado do módulo de elasticidade dos corpos de prova de ECC é mostrado na Tabela 32 e na Figura 104. A análise ANOVA indicou que as médias de C00, C20 e C30 são estatisticamente diferentes, tendo $F(20,96)$ superior à $F_c(4,73)$, assim como C30 e C30-1, com F de 238,22 e F_c de 4,74. Por Tukey, tem-se que o módulo de elasticidade das misturas C00 e C30, C20 e C30 são diferentes e C00 e C20 são iguais. Portanto, o estéril interfere no módulo de elasticidade do ECC apenas para o teor de 30%. A redução da quantidade de água do compósito de C30 para C30-1, pela análise ANOVA, resultou em um F de 238,22, que é superior a F_c de 6,61, sendo os

valores de módulo de elasticidade das misturas C30 e C30-1 estatisticamente diferentes.

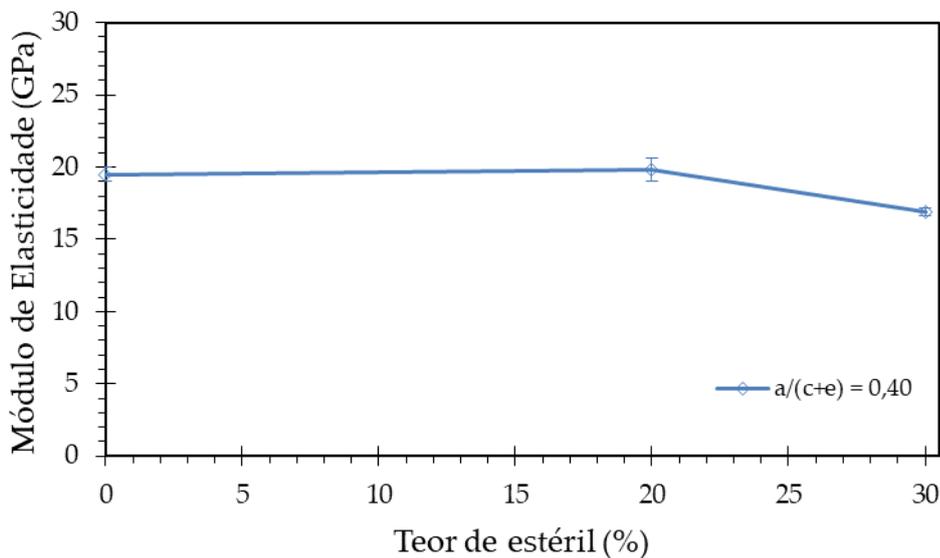


Figura 104 – Módulo de elasticidade dos ECCS aos 28 dias (Fonte: A autora, 2024).

A substituição de 30% de cimento por estéril, implicou na redução do módulo de elasticidade em 15%. Ao reduzir o teor de água no compósito, houve um incremento de 31% no valor do módulo de elasticidade da mistura C30-1 quando comparada à mistura C30.

Os valores de módulo de elasticidade obtidos para o ECC são coerentes com os valores propostos por Li (2019), os quais variam de 15 GPa a 23 GPa.

Em termos do comportamento dos compósitos sob cargas de tração direta, as curvas de tensão x deformação são mostradas na Figura 105. De modo geral, verifica-se que os compósitos apresentaram um comportamento de endurecimento na tração (*strain hardening*) com a formação de múltiplas fissuras quando submetidos à esforços de tração.

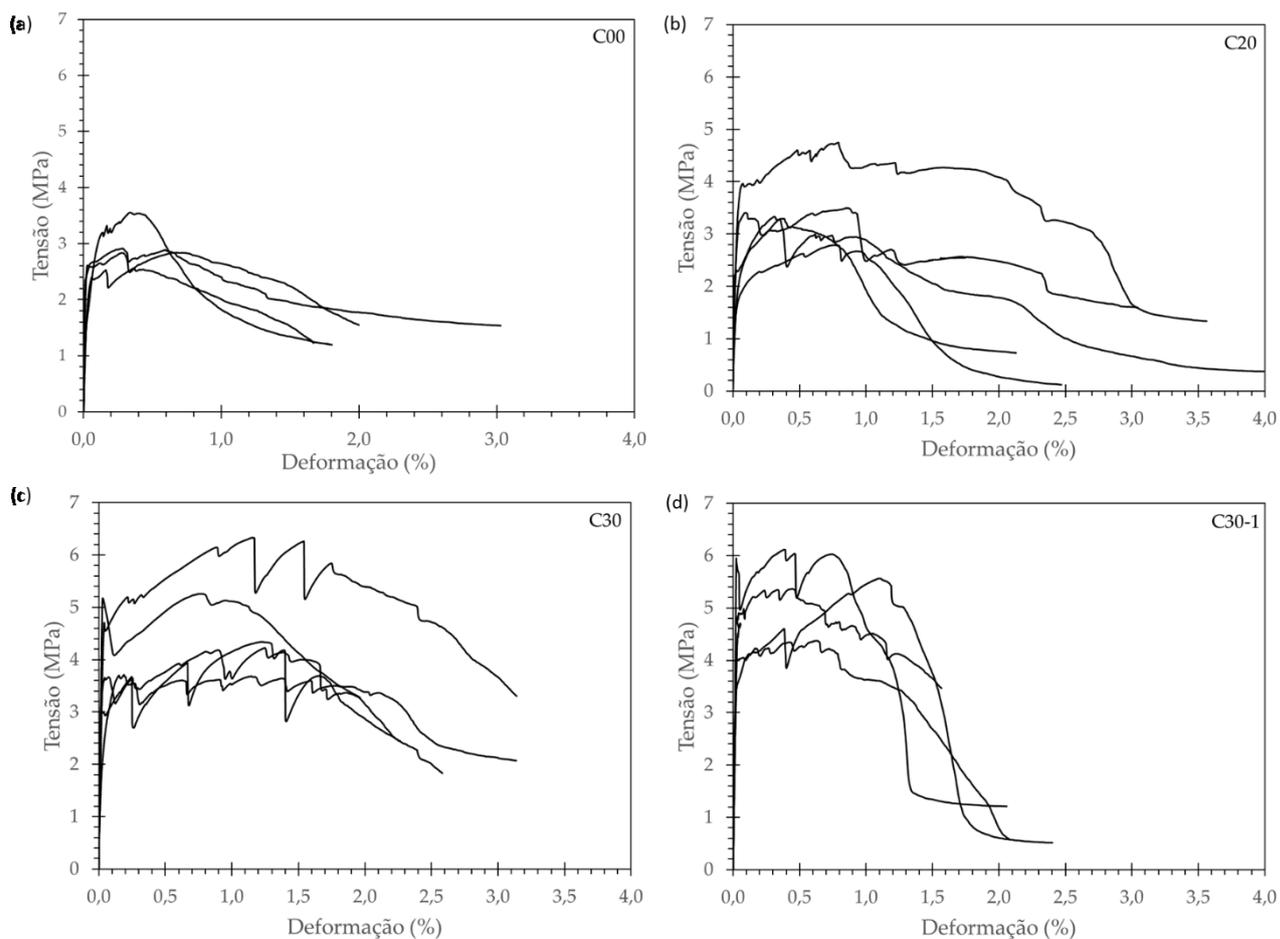


Figura 105 – Resultado do ensaio de tração do ECC – Curva tensão x deformação das misturas (a) C00, (b) C20, (c) C30 e (d) C30-1 (Fonte: A autora, 2024).

Os valores médios e respectivos desvios padrão obtidos nos ensaios de tração direta são apresentados na Tabela 33. Nesta tabela são mostrados os valores de módulo de elasticidade, tensão e deformação de primeira fissura, tensão máxima e deformação de ruptura dos compósitos submetidos à esforços de tração. Da Figura 106 até a Figura 108 são mostradas correlações da influência do teor de estéril nas propriedades obtidas nos ensaios e na Tabela 34 é indicado o resultado da análise estatística ANOVA e Tukey dos resultados obtidos nos ensaios de tração das diferentes misturas de ECC.

Tabela 33 – Resultados do ensaio de resistência à tração direta do ECC aos 28 dias (Fonte: A autora, 2024).

Mistura	E (GPa)	DP	σ_{cc} (MPa)	DP	ε_{cc} (%)	DP	σ_u (MPa)	DP	ε_u (%)	DP
C00	19,22	3,75	2,84	0,25	0,07	0,04	3,10	0,32	0,57	0,13
C20	18,08	3,58	2,99	0,71	0,07	0,03	3,50	0,67	1,14	0,32
C30	18,26	1,96	3,75	0,52	0,05	0,05	4,77	0,93	1,60	0,27
C30-1	20,17	2,22	3,84	0,39	0,02	0,01	5,36	0,63	1,14	0,43

Nota: E – módulo de elasticidade, σ_{cc} – Tensão de primeira fissura, ε_{cc} – Deformação de primeira fissura, σ_u – Tensão última e ε_u – Deformação máxima.

Observa-se que a tensão e deformação de primeira fissura dos diferentes compósitos são estatisticamente iguais. Todavia, a tensão máxima e a deformação máxima são estatisticamente diferentes. Em termos de tensão máxima, as misturas C00 e C30 são diferentes, e em termos de deformação na ruptura, as misturas C00 e C20 e C00 e C30 são estatisticamente diferentes. A substituição de 30% de cimento por estéril (C30) implicou em um aumento da tensão máxima de 54%, quando comparada à mistura de referência (C00). Já para a deformação máxima, os incrementos na deformação foram de 100% (C20) e 180% (C30).

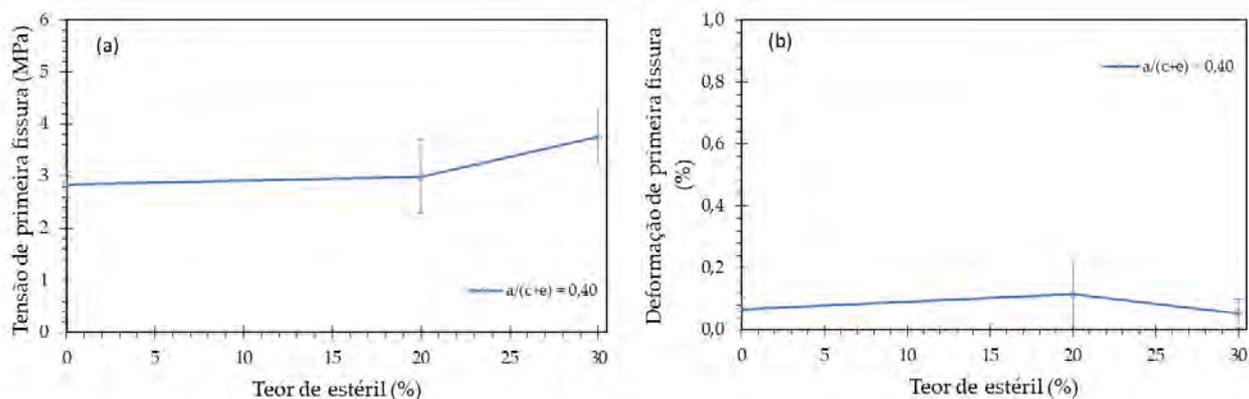


Figura 106 – Resultado do ensaio de tração do ECC – (a) tensão de primeira fissura e (b) deformação de primeira fissura (Fonte: A autora, 2024).

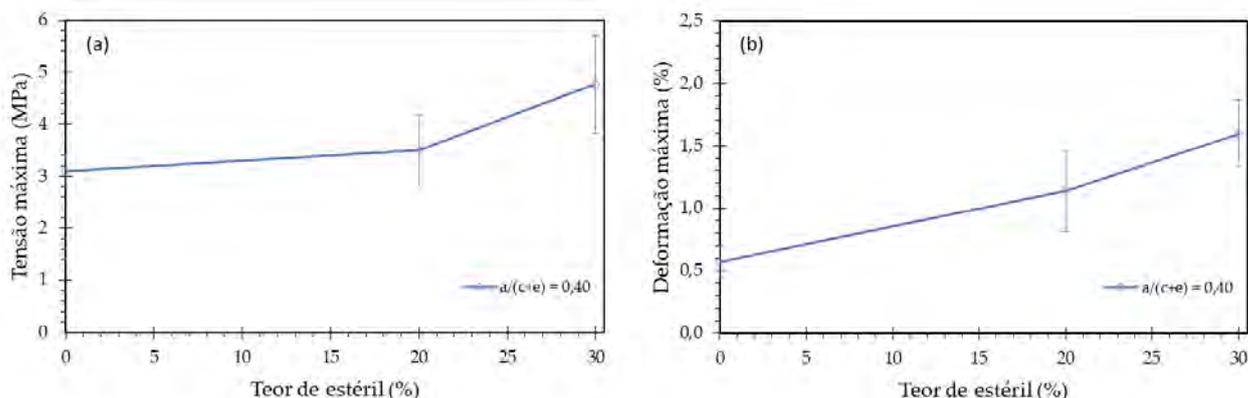


Figura 107 – Resultado do ensaio de tração do ECC – (a) tensão máxima e (b) deformação máxima (Fonte: A autora, 2024).

Tabela 34 – Análise estatística ANOVA e Tukey dos resultados do ensaio de tração do ECC (Fonte: A autora, 2024).

Propriedade	Misturas C00, C20 e C30				Misturas C30 e C30-1		
	F	F _c	ANOVA	Tukey (*)	F	F _c	ANOVA
Tensão primeira fissura (MPa)	2,15	4,46	estatisticamente iguais	-	0,05	5,99	estatisticamente iguais
Deformação primeira fissura (%)	0,18	4,10	estatisticamente iguais	-	1,94	5,32	estatisticamente iguais
Tensão máxima (MPa)	4,71	4,10	estatisticamente diferentes	C00 e C30	0,91	5,59	estatisticamente iguais
Deformação máxima (%)	10,93	4,26	estatisticamente diferentes	C00 e C20 C00 e C30	3,28	5,32	estatisticamente diferentes
Módulo de elasticidade (GPa)	0,08	4,74	estatisticamente iguais	-	1,25	5,99	estatisticamente iguais

(*) As demais combinações de misturas são estatisticamente iguais.

Desta forma, observa-se que a incorporação do estéril proporciona uma maior tensão máxima à tração, e capacidade de deformação, comparada a mistura de referência. De acordo com Huang *et al.* (2013b), o aumento na capacidade de deformação do ECC ocorre devido à redução da tenacidade à fratura da matriz em virtude das partículas de resíduos de mineração utilizadas como fíler proporcionarem uma ligação com partículas cimentícias mais fracas do que entre as partículas de materiais cimentícios. Além disso, segundo Huang *et al.* (2013b), a incorporação de rejeito no ECC geralmente reduz a tensão de primeira fissura do ECC como resultado da diminuição da tenacidade à fratura da matriz. Este comportamento de tensão de

primeira fissura observado por Huang *et al.* (2013b) foi diferente do obtido estatisticamente no presente estudo.

A redução do teor de água na mistura C30-1 influenciou a capacidade de deformação do compósito com redução de 29% na deformação máxima, no entanto, não influenciou significativamente as outras propriedades. Atrushi (2003) aponta que quanto menor a relação água/material cimentício, menor a capacidade de deformar-se antes de sua ruptura. O que é coerente com os resultados observados no presente trabalho.

Outro ponto importante a destacar sobre os resultados do ensaio de tração é que forneceram tensão máxima coerentes com o valor estimado por Li (2019), de 4 a 8MPa. Todavia, a capacidade de deformação dos ECCs foi um pouco inferior ao indicado por Li (2019) de 2% a 8%. Ressalta-se, este fato não foi proporcionado pelo uso do estéril, uma vez que o estéril gerou incrementos no valor da mistura de referência.

Em relação ao módulo de elasticidade na tração direta (Tabela 33 e Figura 108), a análise estatística indicou que os valores das diferentes misturas (C00, C20, C30 e C30-1) são estatisticamente iguais (ver Tabela 34).

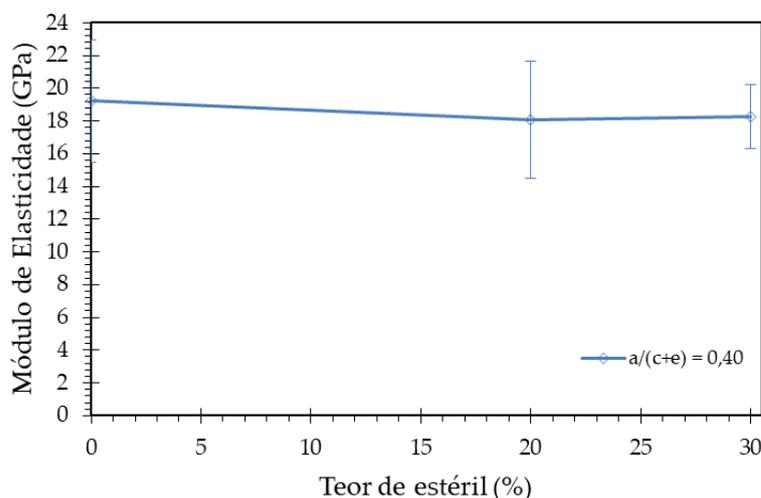


Figura 108 – Resultado do ensaio de tração do ECC – Módulo de Elasticidade (Fonte: A autora, 2024).

Ao comparar do módulo de elasticidade das misturas de ECC submetida a esforços de compressão e de tração (Figura 109), verifica-se que os esforços de

compressão forneceram valores do módulo de elasticidade semelhantes aos obtidos nos ensaios de tração.

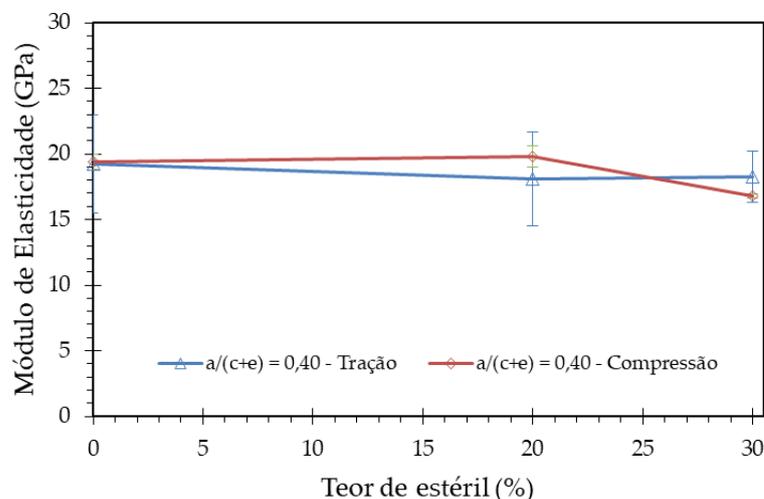


Figura 109 – Comparação do módulo de elasticidade da mistura de ECC submetido a esforços de compressão e de tração (Fonte: A autora, 2024).

Na Figura 110 são ilustrados os corpos de prova após o ensaio de tração. A quantificação das fissuras visíveis e inteiras observadas nos corpos de prova após o ensaio de tração direta é apresentada na Tabela 35. Pela análise ANOVA, tem se um F de 1,93 que foi inferior ao F_c de 3,98 para as misturas C00, C20 e C30 e F de 0,07 que foi inferior ao F_c de 5,32 para as misturas C30 e C30-1, portanto, os valores médios são estatisticamente iguais.



Figura 110 – Corpos de prova de ECC ensaiados à tração (Fonte: A autora, 2024).

Tabela 35 – Quantidade de fissuras nos corpos de prova após o ensaio de tração direta (Fonte: A autora, 2024).

Mistura	a/(c+e)	Teor de estéril (%)	Fissuras	
			número	DP
C00	0,4	0	6	2
C20	0,4	10	7	2
C30	0,4	20	9	2
C30-1	0,32	30	8	2

Por fim, da Figura 111 a Figura 114 são mostradas imagens obtidas pelas análises MEV realizadas nas superfícies de fratura dos corpos de prova após o ensaio de tração direta. Em geral foi observada uma boa dispersão das fibras na matriz (Figura 111a, Figura 112a, Figura 113c e Figura 114b). As análises indicaram que a maior parte das fibras foi arrancada (Figura 111a e b, Figura 112b e c e Figura 114a, b e c), visto que são observados pontos de arrancamento (ou “leitos”) das fibras na matriz. Notou-se poucos casos de ruptura das fibras (Figura 111c, Figura 113a e b e Figura 114a e c). As figuras também mostram poros de diferentes tamanhos nas matrizes dos compósitos (ver Figura 111a, Figura 112a e b e Figura 114a e b)

Também foi verificado que, em alguns casos, as fibras estavam posicionadas de forma perpendicular ao carregamento, uma vez que é possível identificar o leito

das fibras na matriz (ver Figura 111b, Figura 112b e Figura 114b). Esta situação é comum em compósitos com fibras curtas, dispostas de forma randômicas na matriz. No entanto, é ideal ter o mínimo de fibras nesta situação, porque o efeito reduz a capacidade de suportar o carregamento e a deformação do compósito. Portanto, o modo de falha observado, a partir da análise MEV é coerente com o esperado para o ECC.

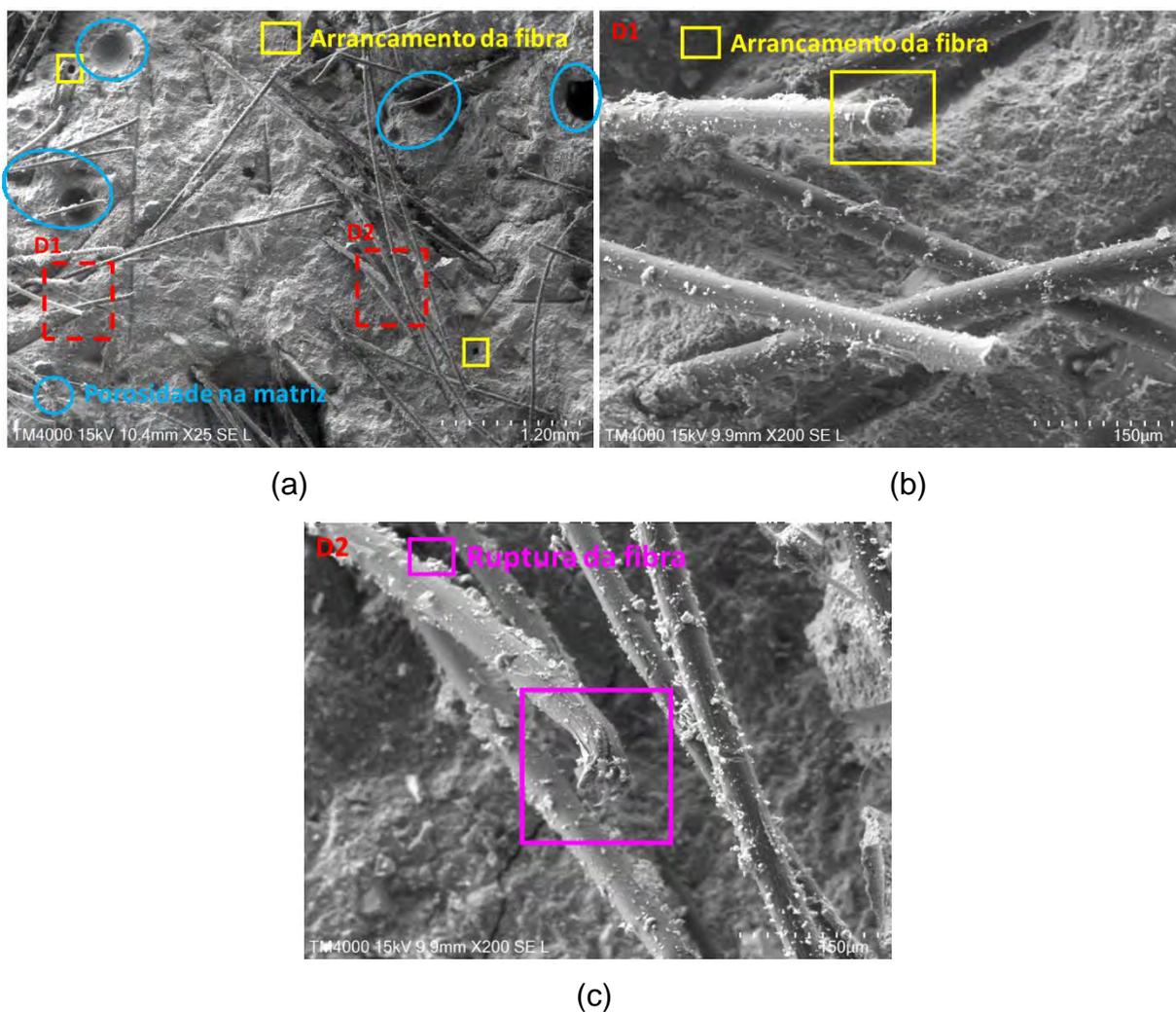
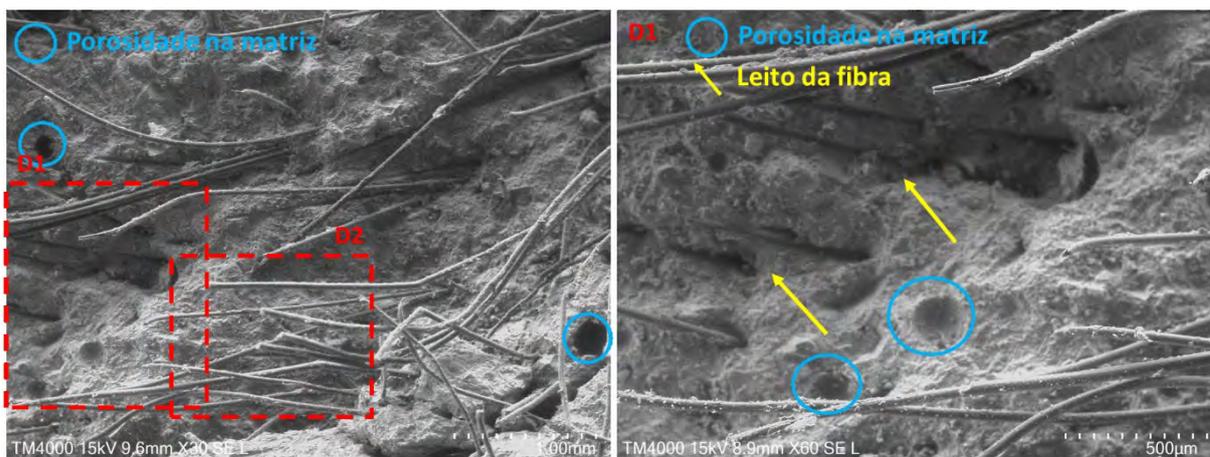
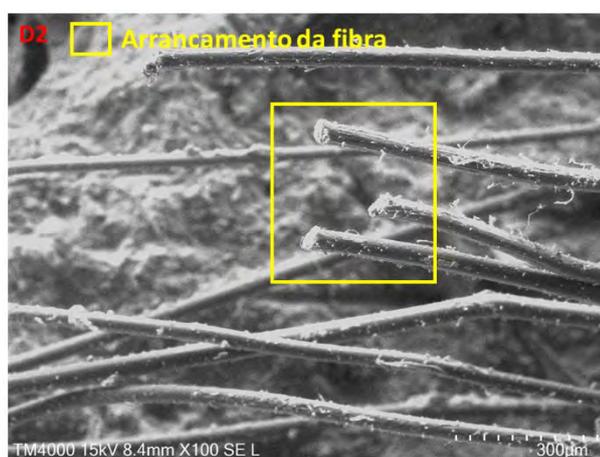


Figura 111 – (a) Imagem MEV da superfície de fratura de um corpo de prova típica do compósito C00, mostrando as regiões analisadas: (b) região D1 e (c) região D2 ampliadas 200 vezes (Fonte: A autora, 2024).



(a)

(b)



(c)

Figura 112 – (a) Imagem MEV da superfície de fratura do corpo de prova típico do compósito C20 mostrando as regiões analisadas: (b) região D1 ampliada 60 vezes e (c) região D2 ampliada 100 vezes (Fonte: A autora, 2024).

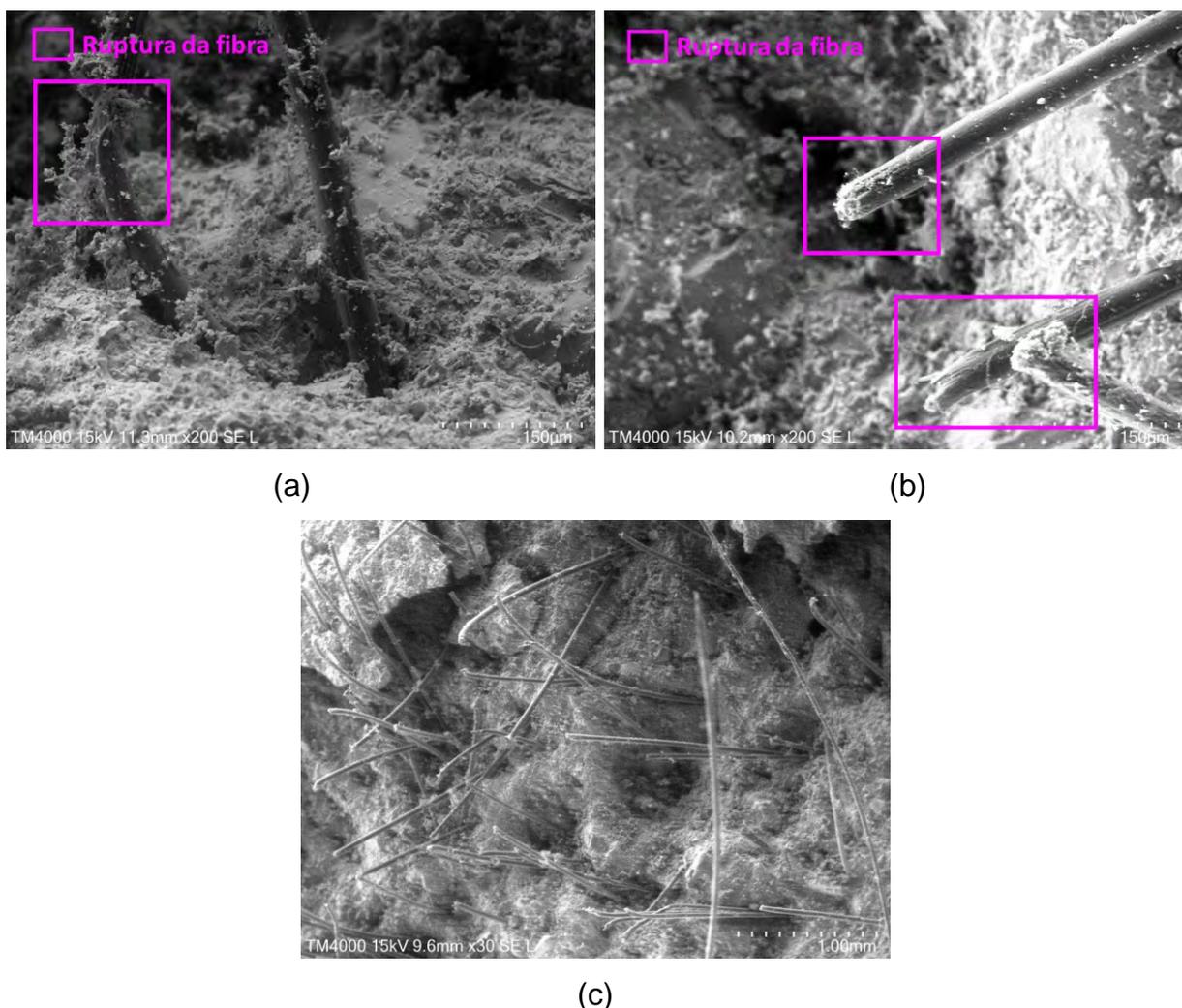


Figura 113 – Imagens MEV da superfície de fratura de um corpo de prova típico do compósito C30: (a) e (b) ampliadas 200 vezes e (c) ampliada 30 vezes (Fonte: A autora, 2024).

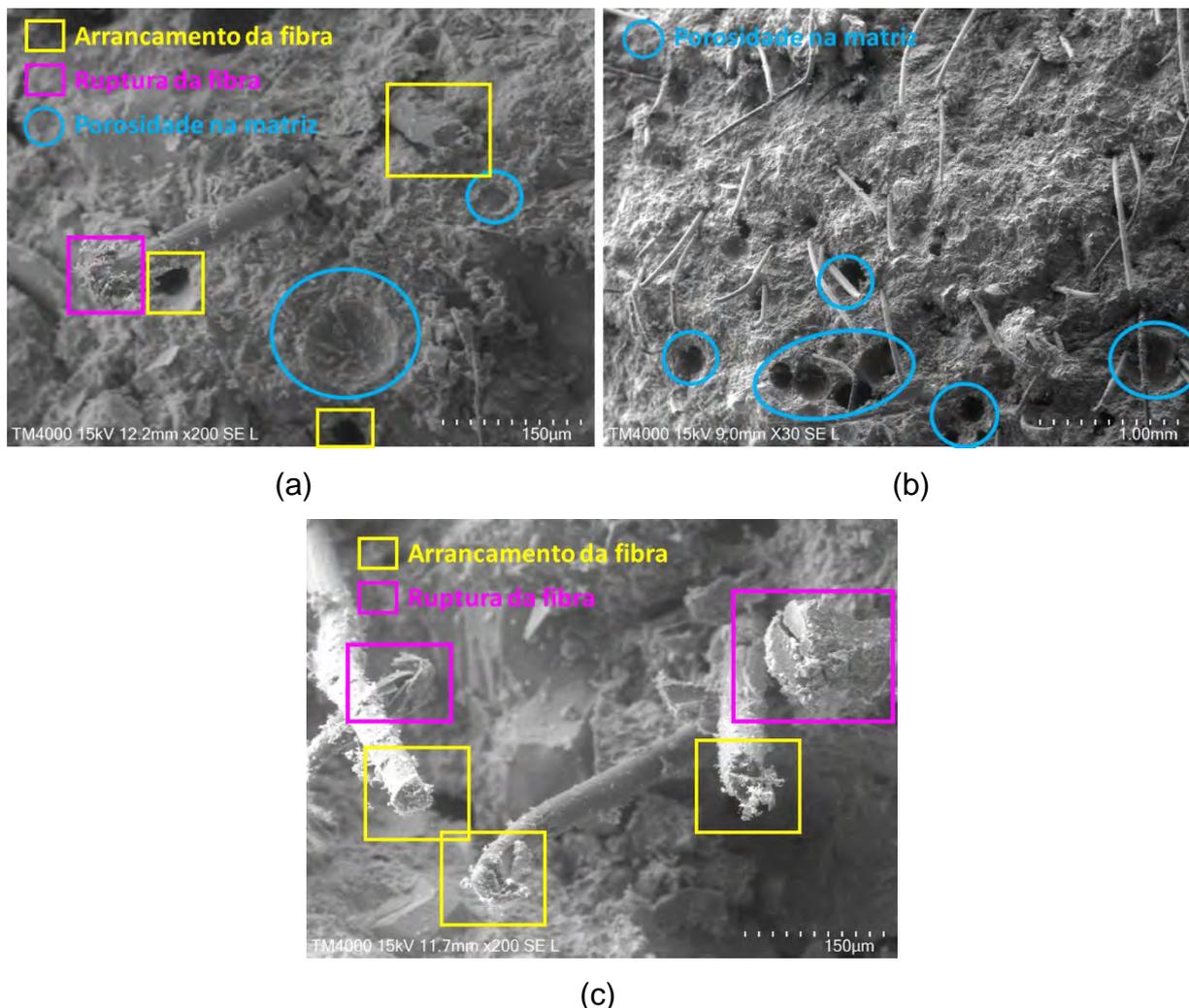


Figura 114 – Imagens MEV da superfície de fratura de um corpo de prova típico do compósito C30-1: (a) ampliada 200 vezes, (b) ampliada 30 vezes e (b) ampliada 200 vezes (Fonte: A autora, 2024).

A respeito dos resultados dos ensaios de flexão, as curvas de tensão vs. deflexão são apresentadas na Figura 115. Observa-se que todos os corpos de prova apresentaram comportamento de endurecimento na flexão (*deflection hardening*) com a formação de múltiplas fissuras quando submetidos à esforços de flexão. Os resultados dos valores médios das propriedades de tensão e deflexão de primeira fissura e tensão e deflexão máximas, obtidas das curvas são apresentados na Tabela 36.

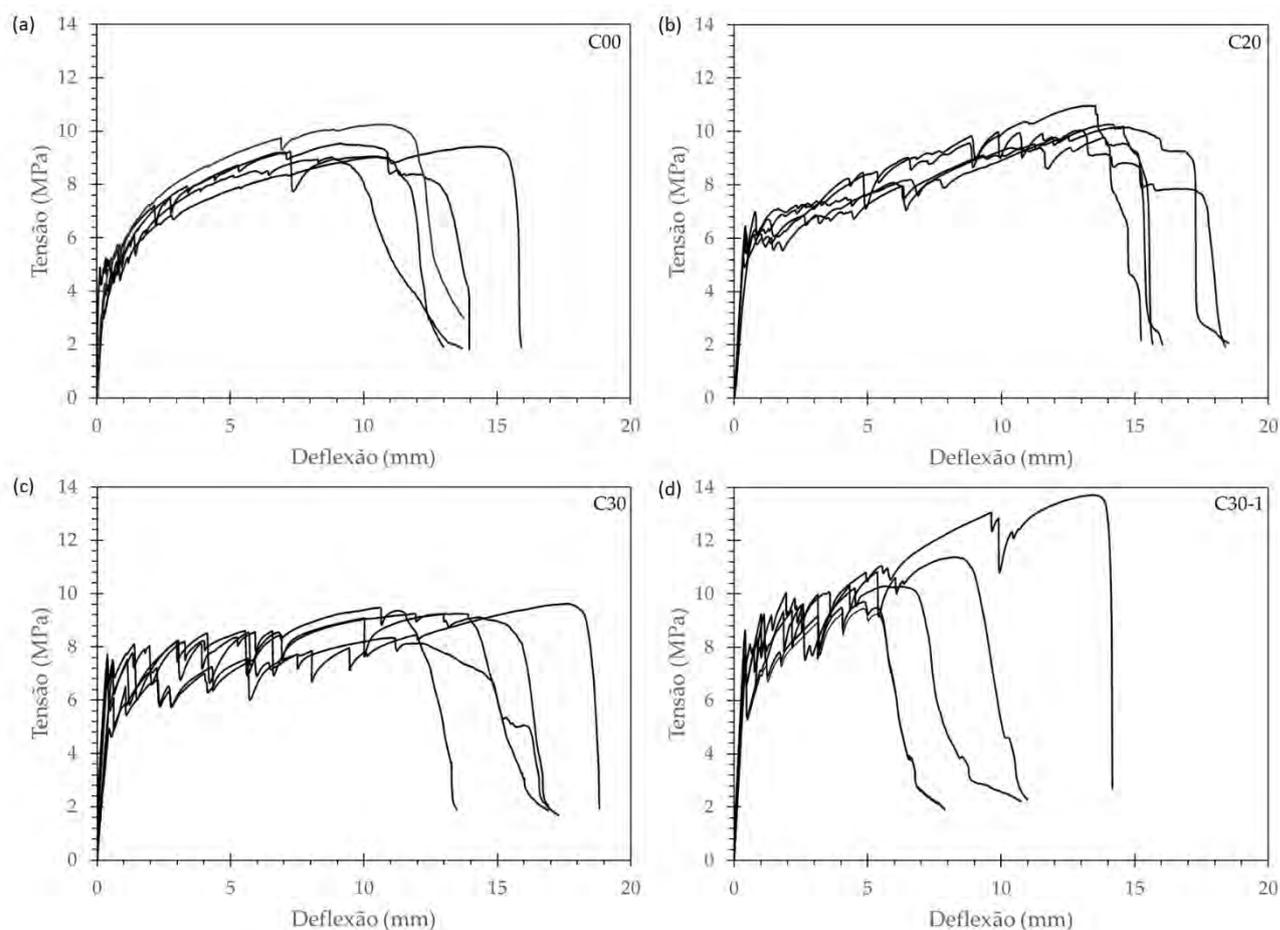


Figura 115 – Resultado do ensaio de flexão do ECC – Curva tensão x deflexão das misturas (a) C00, (b) C20, (c) C30 e (d) C30-1 (Fonte: A autora, 2024).

Tabela 36 – Resultado do ensaio de flexão do ECC (Fonte: A autora, 2024).

Mistura	σ_{cc} (MPa)	DP	ϵ_{cc} (mm)	DP	σ_u (MPa)	DP	ϵ_u (mm)	DP
C00	3,92	0,66	0,23	0,07	9,51	0,41	11,41	1,79
C20	6,05	0,39	0,45	0,13	10,28	0,39	14,64	0,73
C30	6,58	1,12	0,45	0,07	9,19	0,44	14,38	2,24
C30	7,66	0,56	0,41	0,02	10,21	0,75	6,46	1,20

Nota: $a/(c+e)$ = água/(cimento + estéril), σ_{cc} – Tensão de primeira fissura, ϵ_{cc} – Deflexão de primeira fissura, σ_u – Tensão última e ϵ_u – Deflexão máxima.

Na Tabela 37 é indicado o resultado da análise estatística ANOVA realizada nas propriedades obtidas nos ensaios de flexão das misturas de ECC. Observa-se que para todas as propriedades das misturas C00, C20 e C30, as médias são

estatisticamente diferentes. Pela análise de Turkey observa-se que o estéril tem influência nos valores obtidos na flexão, principalmente para o teor de 20% de estéril.

Tabela 37 – Análise estatística ANOVA e Tukey dos resultados do ensaio de flexão do ECC (Fonte: A autora, 2024).

Propriedade	Misturas C00, C20 e C30				Misturas C30 e C30-1		
	F	F _c	ANOVA	Tukey (*)	F	F _c	ANOVA
Tensão primeira fissura (MPa)	6,94	3,89	estatisticamente diferente	C00 e C20 C00 e C30	1,44	5,31	estatisticamente diferentes
Deformação primeira fissura (%)	4,43	3,88	estatisticamente diferentes	C00 e C20	31,80	5,59	estatisticamente diferentes
Tensão máxima (MPa)	7,33	3,89	estatisticamente diferentes	C00 e C20 C20 e C30	5,05	5,59	estatisticamente iguais
Deflexão máxima (%)	12,92	3,89	estatisticamente diferentes	C00 e C20 C00 e C30	3,00	5,32	estatisticamente iguais

(*) As demais combinações de misturas são estatisticamente iguais.

Quanto à influência do teor de estéril na tensão de primeira fissura (Figura 116), verifica-se que a substituição de cimento por estéril aumentou o valor desta tensão em 54% (C20) e em 68% (C30). Da mesma forma, a deflexão de primeira fissura seguiu a mesma tendência, com incremento de deflexão de 95%, para a mistura com 20% de teor de estéril.

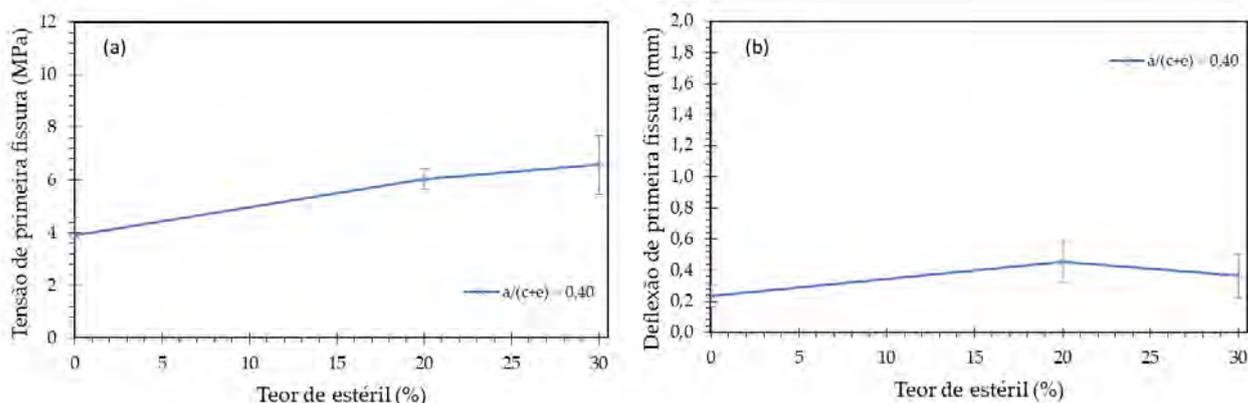


Figura 116– Resultado do ensaio de flexão do ECC – (a) tensão de primeira fissura e (b) deflexão de primeira fissura (Fonte: A autora, 2024).

Conforme é ilustrado na Figura 117, a tensão máxima aumentou com o teor de substituição de cimento por estéril de 0% (C00) para 20% (C30) em 8%. A substituição

de cimento por estéril, implicou em uma maior capacidade de deflexão, medida pela deflexão na ruptura, das misturas C20 e C30 quando comparadas à mistura sem substituição (mistura de referência – C00), o incremento foi de 28% (C20) e 26% (C30).

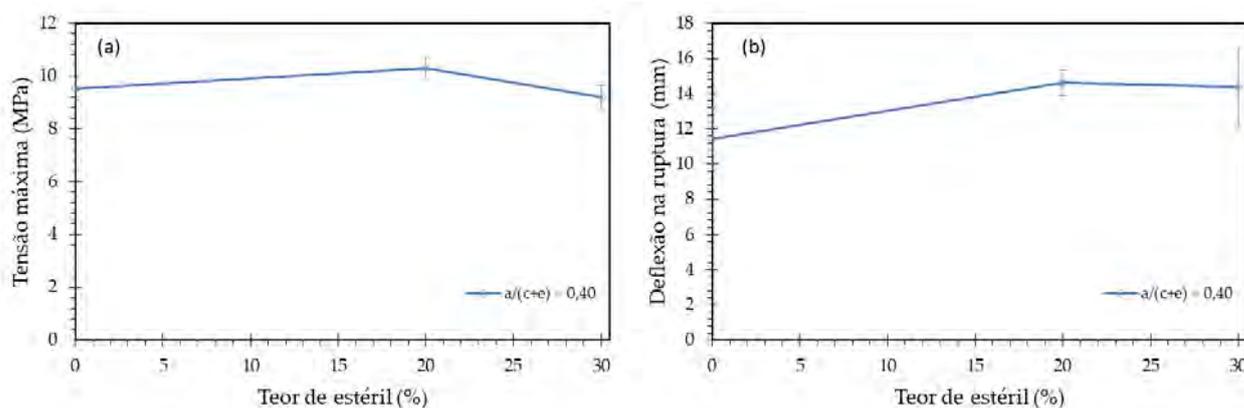


Figura 117 – Resultado do ensaio de flexão do ECC – (a) tensão máxima e (b) deflexão na ruptura (Fonte: A autora, 2024).

Quanto as misturas C30 e C30-1, a análise ANOVA indica que a redução de água na mistura influencia na tensão e deformação de primeira fissura do ECC. À redução do teor de água na mistura, proporcionou maior tensão e deflexão de primeira fissura, houve um aumento de 16% na tensão de primeira fissura e de 8% na deflexão de primeira fissura.

Vital (2023) justifica que a maior quantidade de água na mistura implica em uma menor tensão de primeira fissura do compósito devido à um maior deslizamento das fibras e uma matriz com maior volume de poros, diminuindo a resistência interfacial entre fibra e matriz. A maior porosidade do ECC para o aumento da relação $a/(c+e)$ é discutida na Figura 102 e é coerente com a justificativa de Vital (2023).

Nas Figura 118 e Figura 119 são ilustrados os corpos de prova após o ensaio de flexão. A quantificação das fissuras observadas nos corpos de prova após o ensaio de flexão é mostrada na Tabela 38. Pela análise ANOVA, tem se um F de 32,93 que foi superior ao F_c de 3,98 para a relação $a/(c+e)$ de 0,40, portanto, os valores médios são estatisticamente diferentes. Por Tukey, verifica-se que as misturas C00 e C20 são diferentes. O número de fissuras aumentou para a mistura C20 em relação a mistura

C00. Ao reduzir a quantidade de água no compósito, a análise ANOVA indicou que as misturas C30 e C30-1 são estatisticamente iguais, com F de 0,17 e F_c de 5,59.

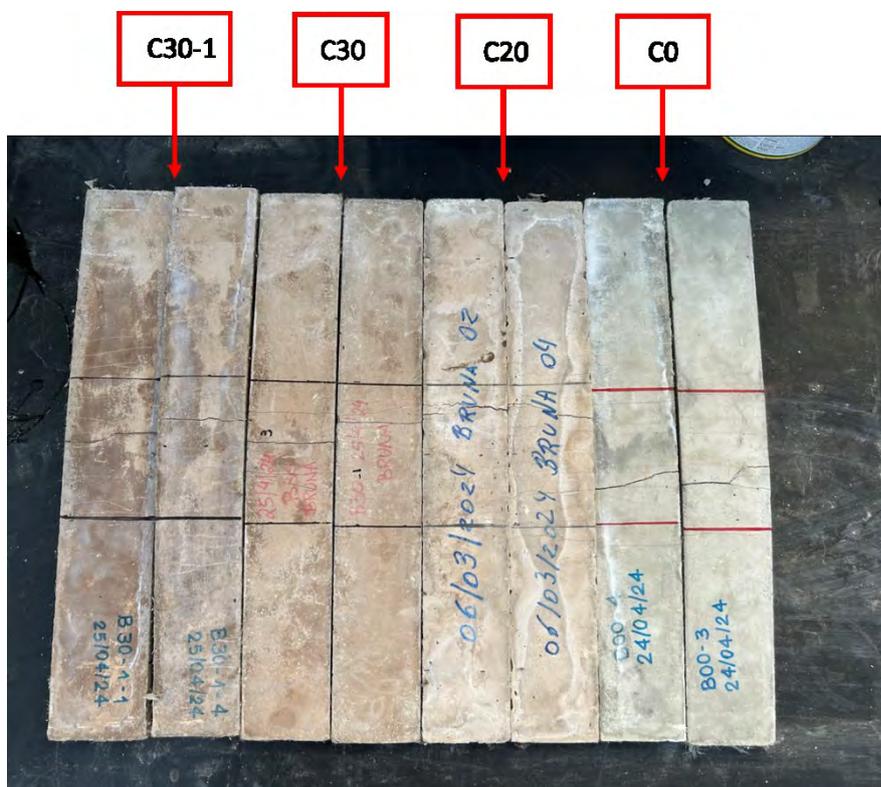


Figura 118 – Corpos de prova de ECC ensaiados à flexão (Fonte: A autora, 2024).

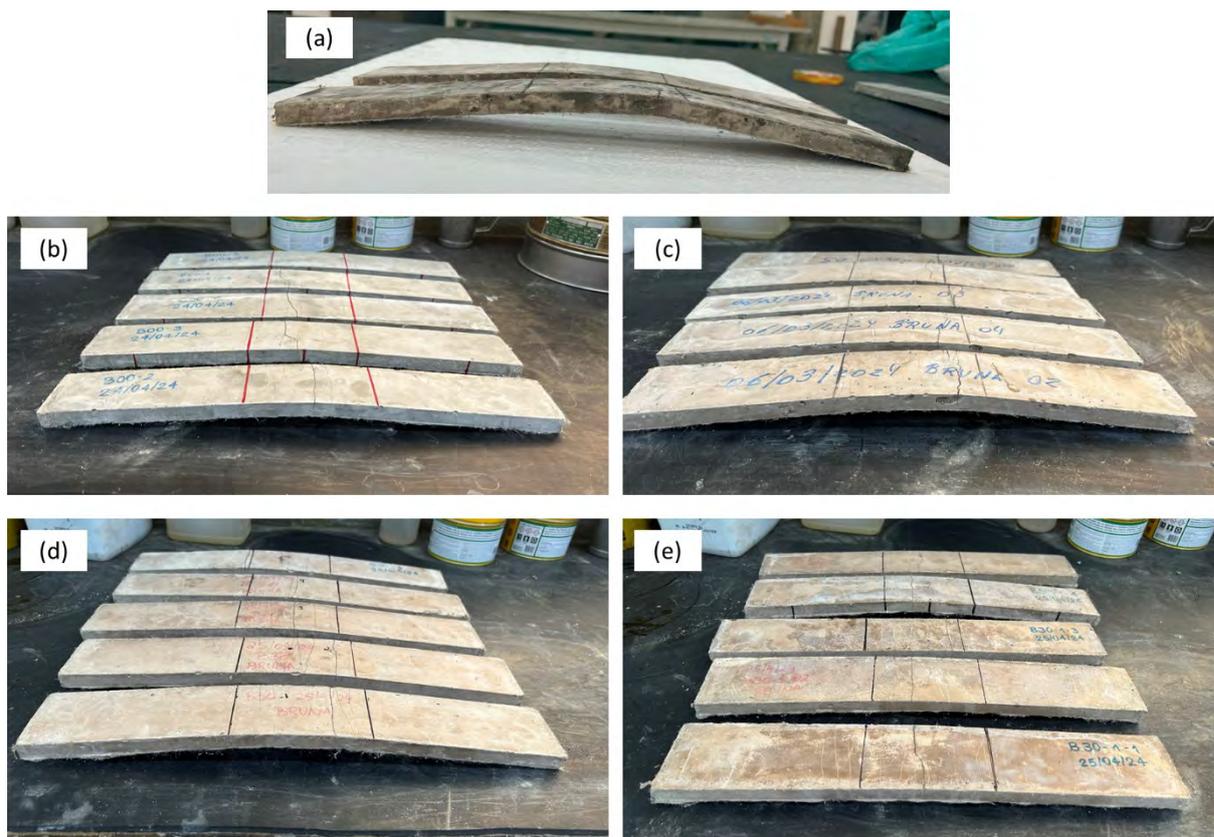


Figura 119 – Corpos de prova após o ensaio de flexão (a) exemplo da deflexão de C20, (b) mistura C00, (c) mistura C20, (d) mistura C30 e (e) mistura C30-1 (Fonte: A autora, 2024).

Tabela 38 – Quantidade de fissuras nos corpos de prova após o ensaio de flexão (Fonte: A autora, 2024).

Mistura	a/(c+e)	Teor de estéril (%)	Fissuras	
			Número	DP
C00	0,4	0	8	0
C20	0,4	10	16	2
C30	0,4	20	9	1
C30-1	0,32	30	8	1

6.4 Comparação das propriedades dos compósitos com as matrizes de argamassa

Neste item é realizada uma comparação dos resultados obtidos para os compósitos (Item 6) com os resultados das matrizes dos compósitos (Item 5).

6.4.1 Propriedades no estado fresco

Primeiramente, em termos de massa específica no estado fresco das misturas, observa-se que os valores foram similares, conforme é apresentado na Figura 120. Para a mistura de referência, houve uma redução da massa específica fresca de 3,6%, para o teor de 20% de substituição de cimento por estéril, houve um aumento de 4,3% e para 30% de estéril, uma redução de 1,2%. Portanto, os valores são próximos e são coerentes. Conclui-se que, como o volume de fibras adicionado nos compósitos é baixo (2%), a fibra não influenciou significativamente na massa específica no estado fresco.

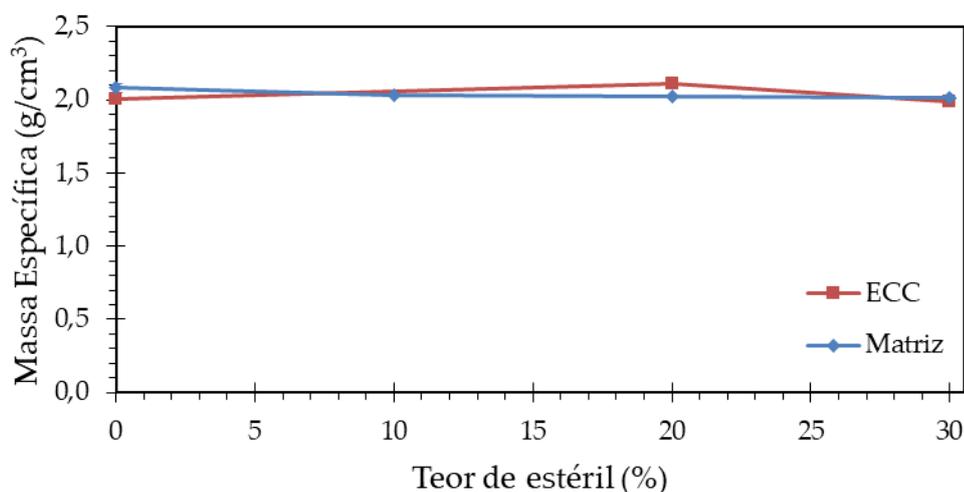


Figura 120 – Comparação da massa específica do ECC com a matriz de argamassa no estado fresco (Fonte: A autora, 2024).

6.4.2 Propriedades no estado endurecido

6.4.2.1 Propriedades físicas

Avaliando as propriedades no estado endurecido, em termos de massa específica real aos 28 dias, a adição das fibras na matriz cimentícia de argamassa não alterou a massa específica da mistura de forma significativa conforme é mostrado na Figura 121, as variações foram de 2,5% para 0% de estéril, 8,6% para 20% de estéril e 2,0% para 30% de estéril.

Por fim, o índice de vazios e a absorção de água dos ECCs seguiram o mesmo padrão de sua matriz cimentícia (argamassa) (Figura 122). A absorção de água do ECC reduziu em 2,8% para a mistura sem estéril, 4,6% para a mistura com 20% de estéril e 4,0% para a mistura com 30% de estéril, em comparação com sua matriz cimentícia. Já o teor de vazios da mistura de ECC, reduziu em 3,7%, para 0% de estéril, 6,4% para 20% de estéril, e 1,4%, para 30% de estéril, todos em comparação com a argamassa.

Logo, verifica-se que os valores de massa específica, índice de vazios e absorção de água do ECC são compatíveis com a matriz de argamassa.

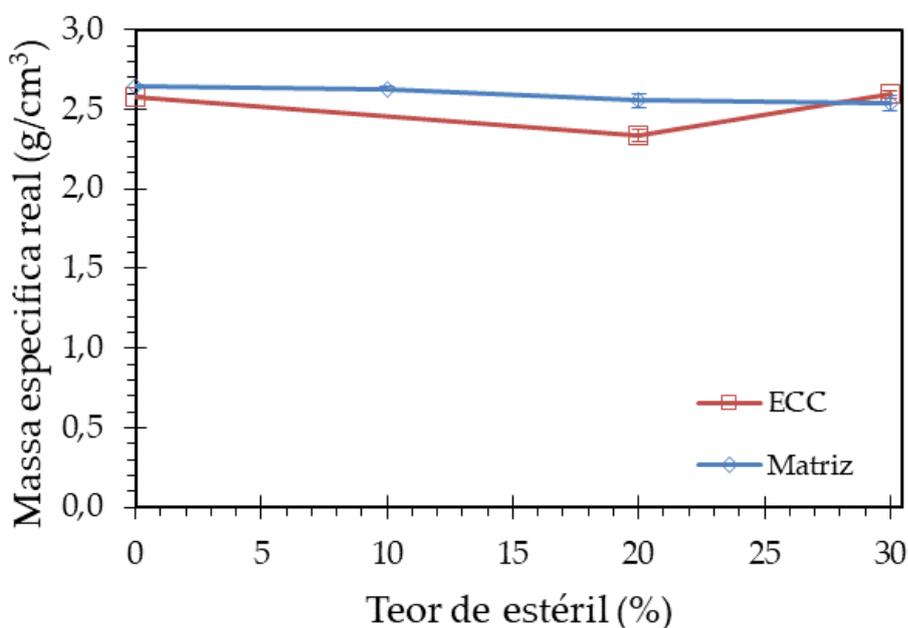


Figura 121 – Comparação da massa específica real do ECC com a matriz de argamassa aos 28 dias (Fonte: A autora, 2024).

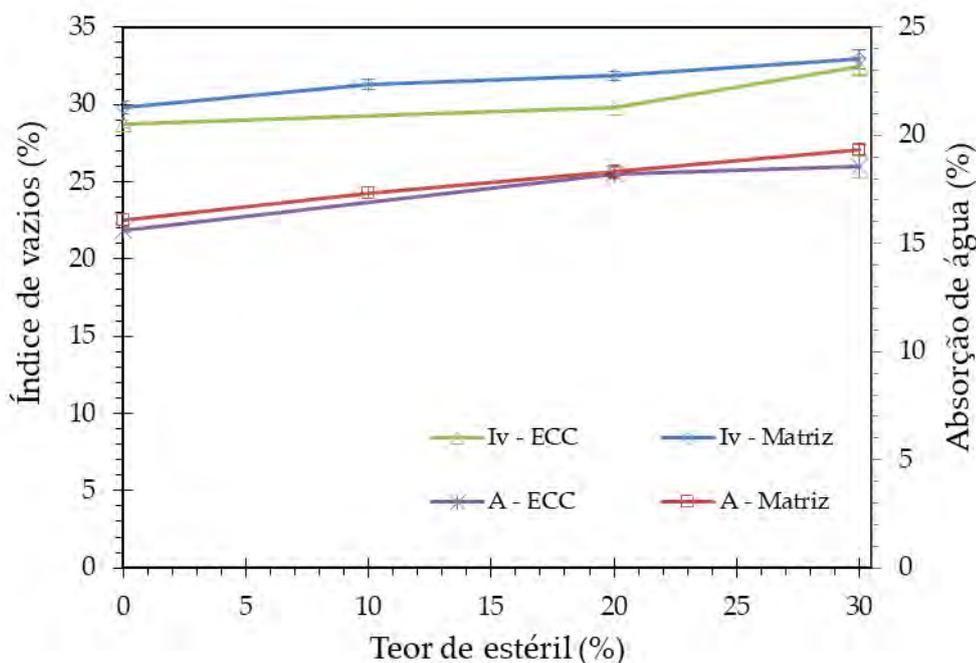


Figura 122 – Comparação do índice de vazios e da absorção de água do ECC com a matriz de argamassa aos 28 dias (Fonte: A autora, 2024).

6.4.2.2 Propriedades mecânicas

Nota-se que a resistência à compressão do ECC com 0% e 20% de estéril, aos 28 dias, foi superior a resistência da matriz (Figura 123). Os ganhos de resistência foram de 18% para a mistura sem estéril e 13% para a mistura com 20% de estéril. Para o teor de substituição de cimento por estéril de 30%, verificou-se uma redução na resistência de 5%. Vale destacar que a adição de fibras na matriz não tem como objetivo alterar o comportamento à compressão do compósito. Este comportamento pode ser justificado pela maior porosidade das misturas de argamassa para os teores de 0% e 20% de estéril, o que implicou em uma menor resistência à compressão da argamassa quando comparada ao ECC. Outro ponto que pode ter contribuído para esta diferença é a adição do superplastificante ter proporcionado uma melhor dispersão da matriz do compósito e com isso uma maior resistência à compressão.

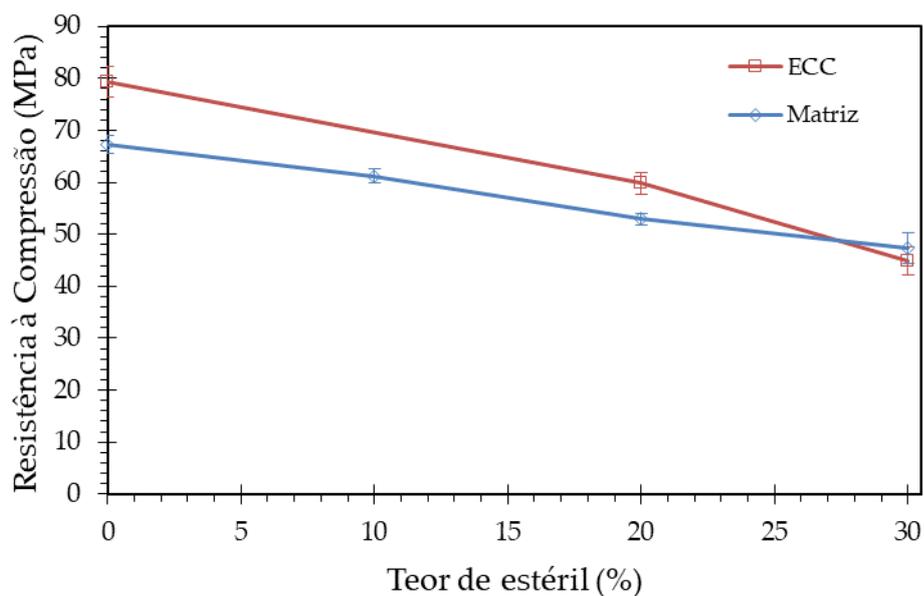


Figura 123 – Comparação da resistência à compressão do ECC com a matriz de argamassa aos 28 dias (Fonte: A autora, 2024).

Quanto ao módulo de elasticidade, conforme é mostrado na Figura 124, o valor do módulo foi semelhante do ECC em comparação com a matriz de argamassa aos 28 dias. Para a mistura de referência (sem estéril), observou-se uma redução do módulo de elasticidade de 5,5%. De modo similar, para o teor de 30% de estéril, houve uma redução de 9,9%. Já para o teor de 20% de estéril, o valor do módulo de elasticidade foi praticamente o mesmo da matriz, variando em 0,8%. Portanto, os valores de módulo de elasticidade do ECC são compatíveis com o valor da matriz.

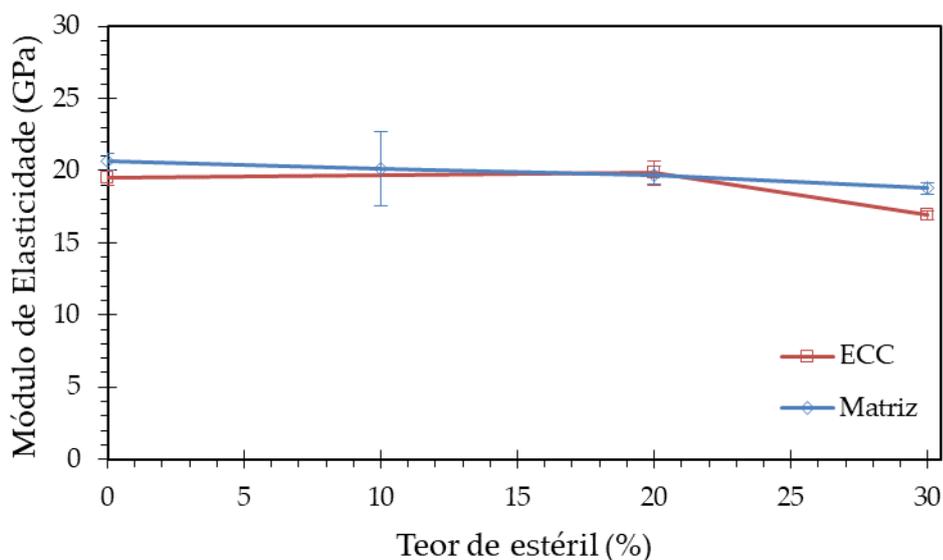


Figura 124 – Comparação do módulo de elasticidade do ECC com a matriz de argamassa aos 28 dias (Fonte: A autora, 2024).

6.5 Conclusão

A utilização de estéril em substituição ao cimento no ECC proporcionou resultados satisfatórios. No estado fresco, a trabalhabilidade das misturas foi adequada uma vez que a mistura atendeu ao ensaio de funil de Mash com o uso do superplastificante e a massa específica foi pouco afetada com o uso de estéril apresentando variações de até 5%.

No estado endurecido, as massas específicas dos corpos de prova com estéril reduziram com o teor de substituição do cimento em até 11%. A absorção de água e o índice de vazios dos ECCs aumentaram com o aumento do teor de substituição de cimento por estéril em até 19% e 13%, respectivamente.

A resistência à compressão axial das misturas de ECC com estéril aos 28 dias reduziu com o aumento do teor de substituição de cimento por estéril visto que o estéril é uma adição mineral do tipo fíler, reduzindo a quantidade de produtos resultantes da hidratação do cimento. O módulo de elasticidade do ECC foi afetado apenas pelo teor de estéril de 30%, tendo uma redução de 15%.

Todos os ECCs com estéril apresentaram comportamento de endurecimento na tração (*strain hardening*) com a formação de múltiplas fissuras quando submetidos

à esforços de tração. O estéril proporcionou uma maior tensão máxima à tração, e conseqüentemente, maior deformação de ruptura comparada à mistura de referência para o teor de 30%. A tensão e a deformação de primeira fissura não foram afetadas pelo uso do estéril. A tensão máxima obtida foi de 4,7 MPa e a deformação máxima de 1,67% para a mistura de 30% de estéril (C30).

A partir da análise de MEV dos corpos de prova após o ensaio de tração, verificou-se que a maior parte das fibras foi arrancada, visto que são observados pontos de arrancamento das fibras na matriz e poucos pontos de ruptura da fibra. Além disso, o posicionamento das fibras na direção perpendicular ao carregamento e a distribuição não uniforme das fibras observadas nas misturas implicam em redução na capacidade de carregamento e de deformação do compósito.

Em relação ao ensaio de flexão, todos os corpos de prova apresentaram comportamento de endurecimento na flexão (*deflection hardening*) com a formação de múltiplas fissuras. O uso do estéril resultou em uma maior tensão e deflexão de primeira fissura à flexão, comparada a mistura de referência, principalmente para o teor de 20% de estéril. E aumentou também a tensão máxima e a capacidade de deflexão do ECC.

Comparando os resultados do ECC com sua matriz cimentícia de argamassa, as massas específicas no estado fresco das misturas foram similares. No estado endurecido, as massas específicas (real e seca) aos 28 dias tiveram incrementos de até 10% em seu valor. Aos 28 dias, a resistência à compressão do ECC foi superior à da argamassa para o ECC de referência e com 20% de estéril. Já o módulo de elasticidade do ECC foi semelhante ao da matriz. E os valores de massa específica, índice de vazios e absorção de água do ECC são compatíveis com a matriz de argamassa.

A redução de água na mistura, resultou em uma menor porosidade, de até 18% e menor absorção de água, de até 25%, conseqüentemente, houve incrementos de 30% na resistência à compressão e de 31% no módulo de elasticidade do ECC. Para os esforços de tração, a deformação máxima reduziu. Já para os esforços de flexão, houve um aumento da tensão e deflexão de primeira fissura. As demais propriedades do ECC para esforços de tração e de flexão não foram alteradas com o uso do estéril.

7 CONCLUSÃO

A utilização do resíduo de mineração do tipo estéril proveniente da extração do minério de ferro em materiais cimentícios se mostrou promissora e inovadora. Na literatura encontra-se muitos poucos estudos sobre a utilização de estéril em materiais cimentícios, o que tornou esta pesquisa inovadora. Neste trabalho foram desenvolvidos estudos de caracterização do estéril bem como sua aplicação em substituição ao cimento em argamassas e em compósitos cimentícios com elevada capacidade de deformação, do tipo ECC. Os resultados obtidos foram pioneiros na área de argamassa e de compósitos cimentícios reforçados com fibras. Já na parte de caracterização do estéril complementaram a grande lacuna existente na bibliografia.

Nesta pesquisa foi verificado que o estéril possui um forte potencial para ser utilizado com adição mineral do tipo fíler em substituição ao cimento, quando realizado apenas o tratamento de beneficiamento por peneiramento na peneira 200. O estéril beneficiado não atinge os requisitos da NBR 12653 (2014) para ser um material pozolânico e não possui fase amorfa, portanto, não é um material pozolânico.

A caracterização do estéril indicou um material sílico-aluminoso com poucos compostos tóxicos presentes e elevada área superficial. Sua morfologia é definida por partículas ultrafinas de formato lamelar, mas que não influenciam de forma significativa em redução de trabalhabilidade de misturas cimentícias. O estéril beneficiado apenas por peneiramento apresenta fase cristalina, sendo necessário algum tipo de tratamento de modo a aumentar sua reatividade e torná-lo amorfo.

A influência do estéril na matriz cimentícia de argamassa foi avaliada para as propriedades no estado fresco e no estado endurecido. No estado fresco, o estéril não afetou as propriedades das misturas de argamassa, não havendo a necessidade do uso de superplastificante. Já no estado endurecido, o estéril influenciou as propriedades físicas de massa específica, absorção de água e índice de vazios. Quanto às propriedades mecânicas das argamassas, foi verificado impacto na resistência à compressão, na tenacidade e na energia de fratura. Em contrapartida, o estéril não impactou o módulo de elasticidade e a resistência à tração por compressão

diametral das argamassas. Observou-se os efeitos de nucleação e diluição provocados pelo estéril aplicado como fíler nas argamassas.

A incorporação do estéril em substituição ao cimento no ECC foi avaliada no estado fresco e endurecido, assim como nas argamassas. No estado fresco, massa específica foi pouco afetada e a trabalhabilidade das misturas foi adequada, todavia, foi necessário o uso do superplastificante. No estado endurecido, as propriedades físicas de massa específica, absorção de água e índice de vazios foram afetadas com o uso estéril. Para as propriedades mecânicas, o estéril exerceu influência na resistência à compressão, módulo de elasticidade, resistência à tração (tensão máxima e na deformação de ruptura) e resistência à flexão (tensão e deflexão de primeira fissura, tensão máxima e deflexão). Todos os ECCs apresentaram comportamento de endurecimento quando submetidos à esforços de tração (*strain hardening*) e flexão (*deflection hardening*) com a formação de múltiplas fissuras.

Com a redução da quantidade de água na mistura, o estéril exerceu influência na porosidade e absorção de água do ECC, assim como na resistência à compressão, no módulo de elasticidade, na resistência à tração (deformação de ruptura) e na resistência à flexão (tensão e deflexão de primeira fissura).

Portanto, a partir desta pesquisa, conclui-se que teores de até 30% de estéril são adequados para a aplicação do estéril em substituição parcial do cimento em argamassas e em compósitos reforçados com fibras do tipo ECC.

7.1 Sugestão de novas pesquisas

A seguir são apresentadas sugestões que podem contribuir/orientar o desenvolvimento de novas pesquisas com aplicação do estéril em materiais cimentícios.

Um ponto chave para tornar o estéril um material pozolânico consiste em transformar sua fase cristalina em amorfa, aumentando assim sua reatividade, uma vez que o estéril possui quantidade de silício e/ou alumínio adequados. Para rejeitos do minério de ferro são propostos por Maruthupandian *et al.* (2021) diversos métodos da ativação pozolânica, como a ativação mecânica, térmica e química de rejeitos, que também podem ser avaliadas para o estéril. Sugere-se assim, o maior

aprofundamento nos métodos de ativação pozolânica e sua posterior aplicação em materiais cimentícios em substituição ao cimento.

Para a utilização do estéril beneficiado pelo peneiramento, utilizado neste estudo, e por outros tipos de tratamento, considera-se interessante também avaliar sua utilização, em combinação com outros tipos de materiais cimentícios suplementares, como a cinza volante ou a metacaulinita, de forma a avaliar os efeitos conjugados de adições binárias ou terciárias na matriz cimentícia de argamassa e no próprio ECC.

Outro tópico que pode complementar a presente pesquisa é a avaliação da influência do estéril na matriz cimentícia em termos de durabilidade da mistura de argamassa, assim como no ECC.

Estudos sobre a verificação da influência do estéril na capacidade de autocicatrização do ECC, assim como a análise do ciclo de vida do estéril, aplicados em argamassas e no ECC, também são inovadores e precisam de pesquisas no tema.

Por fim, para a presente pesquisa foi escolhida a fração de estéril que passa na peneira 200 de forma a permitir sua utilização como adição mineral. Todavia, observa-se também uma carência na bibliografia quanto a utilização da fração grossa do estéril como agregado. Sugere-se o desenvolvimento de misturas com a utilização do estéril como agregado miúdo tanto em argamassas quanto no ECC. É possível realizar um estudo comparativo da aplicação de resíduos de mineração como agregados miúdos no ECC. Huang *et al.* (2013a) utilizou o rejeito do minério de ferro, todavia, para o estéril, não encontrou-se pesquisas sobre o tema. Da mesma forma, não encontrou-se nenhum estudo de sua aplicação em argamassas como agregado, apenas ensaios de caracterização ou pesquisas para sua utilização com agregado graúdo em concretos.

REFERÊNCIAS

- [1] ABID, S.R.; NAHHAB, A.H.; AL-DAHAWI, A.M.; KADHUM, A.L.; ALI, S.H. Mechanical Properties of Engineered Cementitious Composites with Low Cost Fibers and Recycled Glass Filler. *Sustainability*, 15, 9952, 2023.
- [2] ADESINA, A.; DAS, S. Evaluation of the durability properties of engineered cementitious composites incorporating recycled concrete as aggregate, *J. Mater. Civ. Eng.* 33, 2021a, 04020439.
- [3] ADESINA, A.; DAS, S. Mechanical performance of engineered cementitious composite incorporating glass as aggregates, *J. Clean. Prod.* 260, 2020, 121113.
- [4] ADESINA, A.; DAS, S. Sustainable utilization of recycled asphalt as aggregates in engineered cementitious composites, *Constr. Build. Mater.* 283, 2021b, 122727.
- [5] AGBOOLA, O.; BABATUNDE, D.E.; ISAAC FAYOMI, O.S.; SADIKU, E.R.; POPOOLA, P.; MOROPENG, L.; YAHAYA, A.; MAMUDU, O.A. A Review on the Impact of Mining Operation: Monitoring, Assessment and Management. *Results Eng.* 8, 2020, 100181.
- [6] AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO (ANM), Análise de Impacto Regulatório – AIR 48051.000384/2020-43, Aproveitamento de estéril e rejeitos, Brasília, 2020.
- [7] AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO (ANM), RESOLUÇÃO ANM Nº 85, DE 2 DE DEZEMBRO DE 2021. Dispõe sobre procedimentos para o aproveitamento de rejeitos e estéreis. Brasília, 2021.
- [8] AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO (ANM). Anuário Mineral Brasileiro: Principais Substâncias Metálicas. Brasília, 2019.
- [9] ALALOUL, W.S.; MUSARAT, M.A.; TAYEH, B. A.; SIVALINGAM, S.; ROSLI, M.F.B.; HARUNA, S.; KHAN, M.I. Mechanical and deformation properties of

- rubberized engineered cementitious composite (ECC), *Case Stud. Constr. Mater.* 13, 2020, e00385.
- [10] AL-GEMEEL, A.N.; ZHUGE, Y.; YOUSSEF, O. Use of hollow glass microspheres and hybrid fibres to improve the mechanical properties of engineered cementitious composite, *Constr. Build. Mater.* 171, 2018, 858–870.
- [11] ALMADA, B. S. Influência da heterogeneidade de rejeitos de minério de ferro utilizados como adição mineral nas propriedades de microconcretos Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia. 2021.
- [12] ALMADA, B. S.; MELO, H. S. S.; DUARTE, M. S.; AGUILAR, M. T. P.; GARCIA, D. C. S.; SILVA, G. J. B.; DOS SANTOS, W. J. Study of mechanical, durability and microstructural properties of cementitious composite with addition of different iron ore tailings from Brazil. *journal of materials research and technology*; 18, 2022, 1947-1962.
- [13] ALP, I.; DEVECI, H.; SUNG, H. Utilization of flotation wastes of copper slag as raw material in cement production. *Journal of Hazardous Materials* 159, 2008, 390–395.
- [14] ALTWAIR, N.M.; JOHARI, M.A.M.; HASHIM, S.F.S. Flexural performance of green engineered cementitious composites containing high volume of palm oil fuel ash, *Constr. Build. Mater.* 37, 2012, 518–525.
- [15] ALVES, F. E. Brasil Mineral Perspectivas mineração brasileira deve retomar crescimento. 40 anos. 7º Mineração &/X Comunidades. Fórum Brasil Mineral 2022, janeiro/fevereiro, 426, 2023.
- [16] ALVES, M. E.; MASCARENHAS, Y. P.; VAZIIET, C. M. P. Comparação de procedimentos de quantificação de caulinita e gibbsita na fração argila desferrificada de Latossolos”. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 32, 2008, 569-577.
- [17] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, ASTM E 794. Standard Test Method for Melting and Crystallization Temperatures by Thermal Analysis, 2006.

- [18] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, ASTM E399. Standard Test Method for Linear-Elastic Plane-Strain Fracture Toughness of Metallic Materials, 2023.
- [19] ANDRADE, L. C. R. D. Caracterização de rejeitos de mineração de ferro, in natura e segregados, para aplicação como material de construção civil. Tese de doutorado., UFMG, Viçosa, MG, Brasil, 2014.
- [20] ANJOS, M. J.; LOPES, R. T.; DE JESUS, E. F. O.; ASSIS, J. T.; CESAREO, R.; BARRADAS, C. A. A. Quantitative Analysis of Metals in Soil Using X-ray Fluorescence. *Spectrochimica Acta. B*, 55, 2000, 1189-1194.
- [21] ANTIOHOS, S.K. Rice husk ash (RHA) effectiveness in cement and concrete as a function of reactive silica and fineness. *Cement and Concrete Research* 61–62, 2014, 20–27.
- [22] ARGANE, R.; BENZAAZOUA, M.; BOUAMRANE, A.; HAKKOU, R. Cement hydration and durability of low sulfide tailings-based renders: A case study in Moroccan construction. *Minerals Engineering* 76, 2015, 97–108.
- [23] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT), NBR 10004. Resíduos sólidos - Classificação. Rio de Janeiro, 2004.
- [24] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT), NBR 10007. Amostragem de resíduos sólidos. Rio de Janeiro, 2024.
- [25] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT), NBR 11579. Materiais pozolânicos — Requisitos, Rio de Janeiro, 2012.
- [26] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT), NBR 12142. Concreto — Determinação da resistência à tração na flexão de corpos de prova prismáticos, Rio de Janeiro, 2010.
- [27] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT), NBR 12653. Cimento Portland — Determinação do índice de finura por meio da peneira 75 µm (nº 200) Rio de Janeiro, 2014.

- [28] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT), NBR 13276. Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação do índice de consistência. Rio de Janeiro, 2016.
- [29] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT), NBR 13278. Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da densidade de massa e do teor de ar incorporado. Rio de Janeiro, 2005.
- [30] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT), NBR 16605 – Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 2017.
- [31] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT), NBR 16697. Cimento Portland – Requisitos. Rio de Janeiro, 2018.
- [32] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT), NBR 16916 – Agregado miúdo – Determinação da densidade e da absorção de água. Rio de Janeiro, 2021.
- [33] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT), NBR 17054. Agregados — Determinação da composição granulométrica — Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2022.
- [34] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT), NBR 5751. Materiais pozolânicos — Determinação da atividade pozolânica com cal aos sete dias. Rio de Janeiro, 2015.
- [35] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT), NBR 5752. Materiais pozolânicos — Determinação do índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias. Rio de Janeiro, 2014.
- [36] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT), NBR 6458. Grãos de pedregulho retidos na peneira de abertura 4,8 mm - Determinação da massa específica, da massa específica aparente e da absorção de água. Rio de Janeiro, 2016.

- [37] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT), NBR 6459. Solo – Determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro, 2016.
- [38] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT), NBR 6502. Solos e rochas – Terminologia. Rio de Janeiro, 2022).
- [39] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT), NBR 7180. Solo – Determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro, 2016.
- [40] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT), NBR 7181. Solo - Análise granulométrica. Rio de Janeiro, 2016.
- [41] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT), NBR 7211. Agregados para concreto - Requisitos. Rio de Janeiro, 2022.
- [42] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT), NBR 7215. Cimento Portland — Determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2019.
- [43] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT), NBR 7222. Concreto e argamassa — Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos Rio de Janeiro, 2011.
- [44] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT), NBR 7681-2. Calda de cimento para injeção - Parte 2: Determinação do índice de fluidez e da vida útil — Método de ensaio, Rio de Janeiro, 2013.
- [45] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT), NBR 9778. Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro, 2005.
- [46] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT), NBR 15894-3. Metacaulim para uso com cimento Portland em concreto, argamassa e pasta - Parte 3: Determinação da finura por meio da peneira 45 µm, Rio de Janeiro, 2010.

- [47] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT), NBR NBR 16097. Solo — Determinação do teor de umidade — Métodos expeditos de ensaio, Rio de Janeiro, 2012.
- [48] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT), NBR NBR 16372. Cimento Portland e outros materiais em pó - Determinação da finura pelo método de permeabilidade ao ar (método de Blaine), Rio de Janeiro, 2015.
- [49] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT), NBR17086-6. Cimento Portland — Análise química - Parte 6: Determinação da perda ao fogo. Rio de Janeiro, 2023.
- [50] ATRUSHI, D. S. Tensile and Compressive Creep of Early Age Concrete: Testing and Modelling. The Norwegian University of Science and Technology, 2003.
- [51] AZAM, S.; LI, Q. Tailings dam failures: a review of the last one hundred years, *Geotech. News* 28, 2010, 50–54.
- [52] BABAAHMADI, A.; MACHNER, A.; KUNTHER, W.; FIGUEIRA, J.; HEMSTAD, P.; DE WEERDT, K. Chloride binding in Portland composite cements containing metakaolin and silica fume. *Cement and Concrete Research* 161, 2022, 106924.
- [53] BAHRAQ, A.A.; MASLEHUDDIN, M.; AL-DULAIJAN; S.U. Macro-and micro-properties of engineered cementitious composites (ECCs) incorporating industrial waste materials: a review. *Arab. J. Sci. Eng.* 45, 2020, 1–27.
- [54] BAHURUDEEN, A.; WANI, K.; BASIT, M.A.; SANTHANAM, M. Assessment of Pozzolanic Performance of Sugarcane Bagasse Ash. *J. of Materials in Civil Engineering*, 28, 2016.
- [55] BANAAY, K.M.H.; CRUZ, O.G.D.; MUHI, M.M. ENGINEERED CEMENTITIOUS COMPOSITES AS A HIGH-PERFORMANCE FIBER REINFORCED MATERIAL: A REVIEW. *International Journal of GEOMATE*, 24, 101-110, 2023.

- [56] BANG, J.W.; PRABHU, G. G.; JANG, Y.I.; KIM, Y.Y. Development of ecoefficient engineered cementitious composites using supplementary cementitious materials as a binder and bottom ash aggregate as fine aggregate, *Int. J. Polym. Sci.* 2015, 2015, 1–12.
- [57] BARDINI, V. S. D. S. Estudo de viabilidade técnica da utilização de cinzas da queima da casca de Pinus em obras de pavimentação asfáltica. Dissertação de M.Sc., Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, Brasil, 2008.
- [58] BASTOS, L.A.DE C. Utilização de rejeito de barragem de minério de ferro como matéria prima para infraestrutura rodoviária. Universidade Federal de Ouro Preto, 2013.
- [59] BASTOS, L.A.DE C.; SILVA, G.C.; MENDES, J.C.; PEIXOTO, R.A.F. Using iron ore tailings from tailing dams as road. *Material. J. Mater. Civ. Eng.* 28, 2016, 04016102.
- [60] BAUER, L.A.F.; NORONHA, M.A.A.; BAUER, R.J.F. Uso de aditivos no concreto. In: FALCÃO BAUER, L. A. *Materiais de Construção*. 1, 2012, 35-63.
- [61] BENIWAL, P.; RAMAN, E.; USMAN, E.; SANGWAN, S. Use of copper tailings as the partial replacement of sand in concrete. *IJRASET* 3 (Xii), 2015, 1–6.
- [62] BEZERRA, C. G. Caracterização do rejeito de minério de ferro (IOT) e avaliação da sua influência no comportamento físico-químico e mecânico de pastas de cimento, Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2017.
- [63] BEZERRA, C. G.; ROCHA C. A. A.; SIQUEIRA, I. S.; FILHO, R. D. T. Feasibility of iron-rich ore tailing as supplementary cementitious material in cement pastes *Construction and Building Materials* 303, 2021, 124496.
- [64] BIAN, Z.; MIAO, X.; LEI, S.; CHEN, S.E.; WANG, W.; STRUTHERS, S. The challenges of reusing mining and mineral-processing wastes. *Science* 337, 2012, 702-703.

- [65] BITENCOURT, D.G.B.; PINTO, L.F.S.; PAULETTO, E.A.; SILVA, M.T.; GARCIA, G.F. Geração de Drenagem Ácida e de Contaminação por Metais Pesados em Perfis de Solos Construídos em Área de Mineração de Carvão. R. Bras. Ci. Solo, 39, 2015, 1821-1834.
- [66] BOOYA, E.; GOROSPE, K.; DAS, S.; LOH, P. The influence of utilizing slag in lieu of fly ash on the performance of engineered cementitious composites, Constr. Build. Mater. 256, 2020, 119412.
- [67] BORGES, T.C. LEVANTAMENTO DO ESTADO DA ARTE EM PESQUISAS DEDICADAS A DESTINAR REJEITO E/OU ESTÉRIL A NOVOS MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO CIVIL Conclusão de Curso apresentado ao Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais ARAXÁ-MG, 2021.
- [68] BUREAU DE RECHERCHES GÉOLOGIQUES ET MINIÈRES (BRGM). Management of mining, quarrying, ore processing wastes in the European Union; 2001. p. 79, RP-50319-F.
- [69] CAI, L.; MA, B.; LI, X.; LV, Y.; LIU, Z.; JIAN, S. Mechanical and hydration characteristics of autoclaved aerated concrete (AAC) containing iron-tailings: Effect of content and fineness, Constr. Build. Mater. 128, 2016, 361–372.
- [70] CAMPANHA, A. Caracterização de rejeitos de minério de ferro para uso em pavimentação. Tese de doutorado. Universidade Federal de Viçosa, 2011.
- [71] CARVALHO, H. D. S. Análise de retração por secagem em argamassas autonivelantes utilizando adições minerais como substitutos parciais do cimento Portland. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2015, 138 f.
- [72] CEZAR, B. F. Influência da finura da cinza volante no fator de eficiência cimentício e módulo de elasticidade do concreto. Monografia (Graduação em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2021.

- [73] CHANH N.V. Steel fiber reinforced concrete. Proceedings of JSCE–VIFCEA joint seminar on concrete engineering, Vietnam; 2005. 108–16.
- [74] CHEMALE JR., F.; TAKEHARA, L. Minério de Ferro: Geologia e Geometarlungia. São Paulo: Editora Blucher, 2013.
- [75] CHEN, Y.; HUANG, F.; LI, W.; LIU, R.; LI, G.; WEI J. Test research on the effects of mechanochemically activated iron tailings on the compressive strength of concrete. *Construction and Building Materials* 118, 2016, 164–170.
- [76] CHEN, Y.; ZHANG, Y.; CHEN, T.; ZHAO, Y.; BAO, S. Preparation of eco-friendly construction bricks from hematite tailings, *Constr. Build. Mater.* 25, 2011, 2107–2111.
- [77] CHETHAN, V.R.; GOKUL, S.L.; NEELAVENI, S.K.; DILIP, C.H. Experimental studies on ECC by using Polypropylene Fibres, *Int. Res. J. Eng. Technol.* 2, 2015a, 130–136.
- [78] CHETHAN, V.R.; RAMEGOWDA, M.; MANOHARA, H.E. Engineered cementitious composites – a review. *Int. Res. J. Eng. Technol.* 2, 2015b, 144–149.
- [79] CHEUNG, A.K.F.; CHEUNG, C.Y.N.; LEUNG, C.K.Y. A protective pseudo-ductile cementitious layer for external walls of concrete buildings. In: *Fourth International Conference Concrete Under Severe Conditions*, 2004, 1192–1199.
- [80] CHINDAPRASIRT, P.; HOMWUTTIWONG, S.; SIRIVIVATNANON, V. Influence of fly ash fineness on strength, drying shrinkage and sulfate resistance of blended cement mortar, *Cem. Concr. Res.* 34, 2004, 1087–1092.
- [81] CHOWDARY, M.V.S.S.P.; ASADI, S.S. Impact of material properties on characteristics of engineered cementitious composite, *Mater. Today Proc.*, 42, 2021, 325-329.
- [82] CORDEIRO, G.; FILHO, R.T.; FAIRBAIRN, E.; TAVARES, L.; OLIVEIRA, C. Influence of mechanical grinding on the pozzolanic activity of residual

- sugarcane bagasse ash. International RILEM Conference on the Use of Recycled Materials in Building and Structures, RILEM Publications SARI, Barcelona, Spain, 2004, 731-740.
- [83] COSTA, V.M. Resíduo de britagem em substituição da areia natural em compósitos do tipo SHCC e sua aplicação como encamisamento de concretos. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2024, 160f.
- [84] DA CRUZ, T.A.M.; GERALDO, R.H.; COSTA, A.R. D.; MACIEL, K. R. D.; GONÇALVES, J. P.; CAMARINI, G. Microstructural and mineralogical compositions of metakaolin-lime-recycled gypsum plaster ternary systems, *J. Build. Eng.* 47, 2022, 103770.
- [85] DA SILVA, F. L.; ARAÚJO, F. G. S.; TEIXEIRA, M. P.; GOMES, R. C.; VON KRÜGER, F. L. Study of the recovery and recycling of tailings from the concentration of iron ore for the production of ceramic. *Ceram. Int.* 2014, 40, 16085.
- [86] DA SILVA, G R. Caracterização, estudos fundamentais e flotação de minério de ferro goethítico. Dissertação de M.Sc., UFMG, Belo Horizonte, MG, Brasil, 2014.
- [87] DA SILVA, J.P.; SANTOS, Y.R.P.; BELLO, M.I.M.C.V. Aplicação da ANOVA e dos testes de Fisher e Tukey em dados de recalque de edifícios de múltiplos pavimentos. *Revista Principia*, João Pessoa, v. 59, n. 3, p. 829–845, 2022.
- [88] DAS, S.K.; KUMAR, S.; RAMACHANDRARAO, P. Exploitation of iron ore tailing for the development of ceramic tiles, *Waste. Manage.* 20, 2000, 725–729.
- [89] DECRETO Nº 9.406, DE 12 DE JUNHO DE 2018, Regulamenta o Decreto-Lei nº 227, de 28 de fevereiro de 1967, a Lei nº 6.567, de 24 de setembro de 1978, a Lei nº 7.805, de 18 de julho de 1989, e a Lei nº 13.575, de 26 de dezembro de 2017. Brasília, 12 de junho de 2018; 197º da Independência e 130º da República.

- [90] DECRETO-LEI Nº 227, DE 28 DE FEVEREIRO DE 1967, Dá nova redação ao Decreto-Lei nº 1.985 (Código de Minas) de 29 de janeiro de 1940. Diário Oficial da União - Seção 1 - 28/2/1967, Página 2417.
- [91] DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL (DNPM), Sumário Mineral Brasileiro 2018 - Ferro (ano base 2017), Agência Nacional de Mineração, 2018.
- [92] DESCHNER, F.; WINNEFELD, F.; LOTHENBACH, B.; SEUFERT, S.; SCHWESIG, P.; DITTRICH, S.; NEUNHOEFFER, F. G.; NEUBAUER, J. Hydration of Portland cement with high replacement by siliceous fly ash, *Cem. Concr. Res.* 42, 2012, 1389–1400.
- [93] DING, Y.; YU, J.; YU, K.-Q.; XU, S. Basic mechanical properties of ultra-high ductility cementitious composites: from 40 MPa to 120 MPa, *Compos. Struct.* 185, 2018b, 634–645.
- [94] DING, Y.; YU, K.-Q.; YU, J.; XU, S. Structural behaviors of ultra-high performance engineered cementitious composites (UHP-ECC) beams subjected to bending-experimental study, *Constr. Build. Mater.* 177, 2018, 102–115.
- [95] DING, Y.; YU, K.-Q.; YU, J.; XU, S. Structural behaviors of ultra-high performance engineered cementitious composites (UHP-ECC) beams subjected to bending-experimental study, *Constr. Build. Mater.* 177, 2018a, 102–115.
- [96] DMT Group (2020) disponível em https://www.dmt-group.com/fileadmin/_process ed_/8/0/csm_Bergbau-1920_e124fb27d6.png.
- [97] DOLD, B. Evolution of acid mine drainage formation in sulphidic mine tailings. *Minerals* 4, 2014; 621–641.
- [98] DUAN, P.; YAN, C.; ZHOU, W.; REN, D. Development of fly ash and iron ore tailing based porous geopolymer for removal of Cu (II) from wastewater. *Ceramics International* 42, 2016, 13507–13518.

- [99] DUDKA, S.; ADRIANO, D. Environmental impacts of metal ore mining and processing: a review. *J. Environ. Qual.* 26, 1997, 590–602.
- [100] EDRAKI, M.; BAUMGARTL, T.; MANLAPIG, E.; BRADSHAW, D.; FRANKS, D.M.; MORAN, C.J. Designing mine tailings for better environmental, social and economic outcomes: a review of alternative approaches, *Journal of Cleaner Production* 84, 2014, 411-420.
- [101] FISCHER, G. Application of engineered cementitious composites (ECC) in prefabricated modular housing. *ACI Spec. Publ.* 268, 2010, 17–28.
- [102] FONTES, W. C.; JANUZZI, R. V.; BORGES, R. A.; CURY, A. A.; PEIXOTO, R. A. F. Resíduo da mineração de ferro como matéria-prima alternativa no desenvolvimento de argamassas de revestimento e assentamento. In: *Anais do 56º Congresso Brasileiro Do Concreto - CBC2014.* 2014.
- [103] FONTES, W. C.; MENDES, J. C.; DA SILVA, S. N.; PEIXOTO, R. A. F. Mortars for laying and coating produced with iron ore tailings from tailing dams. *Construction and Building Materials* 112, 2016, 988–995.
- [104] FUKUYAMA, H.; SUWADA, H. Experimental response of HPFRCC dampers for structural control. *J. Adv. Concr. Technol.* 1, 2003, 317–326.
- [105] FUNDAÇÃO ESTADUAL DO MEIO AMBIENTE (FEAM). *Inventário de Resíduos Sólidos da Mineração: Ano Base 2017.* Belo Horizonte: 2018. 47p.
- [106] G1, Rejeitos de barragens atingem áreas de até 100 km em MG 2015. Disponível em (acessado em 20/11/15)
- [107] GALVÃO, J. L. B.; ANDRADE, H. D.; BRIGOLINI, G. J.; PEIXOTO, R. A. F.; MENDES, J. C. Reuse of iron ore tailings from tailings dams as pigment for sustainable paints. *Journal of Cleaner Production* 200, 2018, 412.
- [108] GARAJAU, N. S. AVALIAÇÃO DO ESTÉRIL ORIUNDO DA EXPLORAÇÃO DE MINÉRIO DE FERRO. Trabalho de Conclusão de Curso. Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, 2019.

- [109] GAYANA B C.; CHANDAR, K.R. A study on suitability of iron ore overburden waste rock for partial replacement of coarse aggregates in concrete pavements. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 431, 2018, 102012.
- [110] GUAN, X.; LI, Y.; LIU, T.; ZHANG, C. LI, H.; OU, J. An economical ultra-high ductile engineered cementitious composite with large amount of coarse river sand, *Constr. Build. Mater.* 201, 2019, 461–472.
- [111] GUAN, X.; ZHANG, C.; LI, Y.; ZHAO, S. Effect of exposure conditions on self-healing behavior of engineered cementitious composite incorporating limestone powder, *Cem. Concr. Compos.* 114, 2020, 103808.
- [112] GUPTA G.; SHARMA S.K.; SINGH, G. S. P.; KISHORE, N. Numerical Modelling-Based Stability Analysis of Waste Dump Slope Structures in Open-Pit Mines-A Review. *J. Inst. Eng. India Ser.* 102, 2021, 589–601.
- [113] HAKKOU, R.; BENZAAZOUA, M.; BUSSIÈRE, B. Acid mine drainage at the abandoned Kettara mine (Morocco): 2. Mine waste geochemical behavior, *Mine Water Environ.* 27, 2008, 160–170.
- [114] HALVAEI, M.; JAMSHIDI, M.; LATIFI, M. Application of low modulus polymeric fibers in engineered cementitious composites, *J. Ind. Text.* 43, 2014, 511–524.
- [115] HALVAEI, M.; JAMSHIDI, M.; LATIFI, M.; BEHDOUJ, Z. Performance of low modulus fibers in engineered cementitious composites (ECCs): flexural strength and pull out resistance. *Adv. Mater. Res.* 687, 2013a, 495–501.
- [116] HALVAEI, M.; JAMSHIDI, M.; LATIFI, M.; BEHDOUJ, Z. The effect of nylon fibres on mechanical properties of engineered cementitious composites (ECCs), in: *The fourth International Conference on Concrete & Development*, 2013b.
- [117] HAN, F.; LI, L.; SONG, S.; LIU, J. Early-age hydration characteristics of composite binder containing iron tailing powder. *Powder Technology* 315, 2017, 322–331.

- [118] HEEDE, P.; MIGNON, A.; HABERT, G.; BELLE, N. Cradle-to-gate life cycle assessment of self-healing engineered cementitious composite with in-house developed (semi-)synthetic superabsorbent polymers. *Cement and Concrete Composites* 94, 2018, 166–180.
- [119] HERNÁNDEZ, J. F. M.; MIDDENDORF, B.; GEHRKE, M.; BUDELMANN, H. Use of wastes of the sugar industry as pozzolana in lime-pozzolana binders: study of the reaction. *Cement and Concrete Research*, 28, 1998, 1525-1536.
- [120] HIROSHI, M.; KUMILKO, S.; NOBORU, S.; TAKENORI, H.; KEJI, S. Application of overlay reinforcement method on steel deck utilizing engineered cementitious composites -Mihara Bridge. *Bridg. Infrastruct.* 8, 2005, 88–91.
- [121] HISSEINE, O.A.; TAGNIT-HAMOU, A. Characterization and nano-engineering the interface properties of PVA fibers in strain-hardening cementitious composites incorporating high-volume ground-glass pozzolans, *Constr. Build. Mater.* 234, 2020, 117213.
- [122] HU, S.; CAI, H.; HONG, R.; LI, M., YAO, F. Performance test and microstructure of modified PVC aggregate-hybrid fiber reinforced engineering cementitious composite (ECC), *Materials (Basel)* 14, 2021, 1856.
- [123] HUANG, B.; WU, H.; SHU, X.; BURDETTE E.G. Laboratory evaluation of permeability and strength of polymer-modified pervious concrete. *Elsevier Journal. Construction and Building Materials*, 2009.
- [124] HUANG, B.-T.; WU, J.-Q.; YU, J.; DAI, J.-G.; LEUNG, C.K.Y. High-strength seawater sea-sand Engineered Cementitious Composites (SS-ECC): Mechanical performance and probabilistic modeling, *Cem. Concr. Compos.* 114, 2020, 103740.
- [125] HUANG, B.T.; WU, J.Q.; YU, J.; DAI, J.G.; LEUNG, C.K.Y.; LI, V.C. Seawater sea-sand engineered/strain-hardening cementitious composites (ECC/SHCC): assessment and modeling of crack characteristics, *Cem. Concr. Res.* 140, 2021, 106292.

- [126] HUANG, L.; KRIGSVOLL, G.; JOHANSEN, F.; LIU, Y.; ZHANG, X. Carbon emission of global construction sector, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 81, 2018. 1906–1916.
- [127] HUANG, X.; RANADE, R.; LI, V.C. Feasibility study of developing green ECC using Iron Ore Tailings (IOT) powder as cement replacement. *ASCE J. Mater.* 25, 2013a, 923–931.
- [128] HUANG, X.; RANADE, R.; ZHANG, Q.; NI, W.; LI, V.C. Development of green engineered cementitious composites using iron ore tailings as aggregates. *J. Constr. Build. Mater.* 44, 2013b, 757–764.
- [129] INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO (IBRAM). Economia mineral 2020. Disponível em: <https://ibram.org.br/wp-content/uploads/2020/12/Econ-mineral-fev2020.pdf>. 2020c
- [130] INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA), Global Status Report for Buildings and Construction: Towards a zero-emission, efficient and resilient buildings and construction sector, UN Environment Program. (2019) 41.
- [131] INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). Roadmap, low-carbon transition in the cement industry, Cement Sustainability Initiative (CSI) of the World Business Council for Sustainable Development (WBCSD). Technology, 2018.
- [132] JAMIESON, H.E. Geochemistry and mineralogy of solid mine waste: essential knowledge for predicting environmental impact. *Elements* 7, 2011, 381-386.
- [133] JANKOVIC, K.; BOJOVIC, D.; STOJANOVIC, M.; LONCAR, L. The use of mine tailings as a partial aggregate replacement in SCC concrete. In: International Conference - Contemporary Achievements in Civil Engineering, 2015, 67–72.
- [134] JAPAN CONCRETE INSTITUTE (JCI), Proceedings of the JCI Workshop on Ductile Fiber Reinforced Cementitious Composites (DFRCC) - Application and Evaluation, Tokyo, Japan, 2002.

- [135] JAPAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS (JSCE). Recommendations for Design and Construction of High Performance Fiber Reinforced Cement Composites with Multiple Fine Cracks (HPFRCC). Concrete Engineering Series 82, 2008, 1–16.
- [136] JING, H.; LI, M.; ZHANG, Y.; GAO, M. Hydration kinetics, microstructure and physicochemical performance of metakaolin-blended cementitious composites. Construction and Building Materials 408, 2023, 133756.
- [137] JOHNA, V.M.; DAMINELIA, B.L.; QUATTRONEA, M.; PILEGGIA, R.G. Fillers in cementitious materials — Experience, recent advances and future potential. Cement and Concrete Research 114, 2018, 65–78.
- [138] JUNIA, N.L.D.C.D. Caracterização mineralógica, geoquímica e tecnológica das formações ferríferas carbonáticas do depósito de jangada, visando aproveitamento econômico, quadrilátero ferrífero, minas gerais. 223f. Tese (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Geologia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2017.
- [139] KALISZ, S.; KIBORT, K.; MIODUSKA, J.; LIEDER, M.; MAŁACHOWSKA, A. Waste management in the mining industry of metals ores, coal, oil and natural gas - A review Journal of Environmental Management 304, 2022, 114239.
- [140] KANDA, T.; LI, V.C. Multiple Cracking Sequence and Saturation in Fiber Reinforced Cementitious Composites. Concrete Research and Technology. 9, 1998; 19-33.
- [141] KANDA, T.; LI, V.C. Practical design criteria for saturated pseudo strain hardening behavior in ECC. J. Adv. Concr. Technol. 4, 2006, 59–72.
- [142] KANDA, T.; NAGAI, S.; MARUTA, M.; YAMAMOTO, Y. New high-rise R/C structure using ECC coupling beams. In: 2nd International RILEM Conference on Strain Hardening Cementitious Composites, Rio, Brazil, 2011. 289–296.

- [143] KANG J.; BOLANDER J. Event-based Lattice Modeling of Strain-Hardening Cementitious Composites, *International Journal of Fracture*, 206, 2017, 245-261.
- [144] KE, X.; ZHOU, X.; WANG, X.; WANG, T.; HOU, H.; ZHOU, M. Effect of tailings fineness on the pore structure development of cemented paste backfill, *Constr. Build. Mater.* 126, 2016, 345–350.
- [145] KESNER, K.E.; BILLINGTON, S.L.; DOUGLAS, K.S. Cyclic response of highly ductile fiber-reinforced cement-based composite, *ACI Mater. J.* 100, 2003, 381–390.
- [146] KHALIL, A.; HANICH, L.; BANNARI, A.; ZOUHRI, L.; POURRET, O.; HAKKOU, R. Assessment of soil contamination around an abandoned mine in a semi-arid environment using geochemistry and geostatistics: pre-work of geochemical process modeling with numerical models, *J. Geochem. Explor.* 125, 2013, 117–129.
- [147] KIM, D.-J.; NAAMAN, A.E.; EL-TAWIL, S. High performance Fiber reinforced cement composites with innovative slip hardening twisted steel fibers. *Int. J. Concr. Struct. Mater.* 3, 2009, 119–126.
- [148] KLOCKENKAMPER, R.; VON BOHLEN, A. Elemental analysis of environmental samples by Total Reflection Fluorescence: a Review. *X-ray Spectrum.* 25, 1996, 156-162.
- [149] KRISHNARAJA, A.R.; KANDASAMY, S. Mechanical properties of engineered cementitious composites developed with silica fume, *Cement, Wapno, Beton* 2020, 2020, 282–291.
- [150] KUMAR, A.A.; RAGUL. Strength and Durability of High Volume Fly Ash in Engineered Cementitious Composites. *Materials Today: Proceedings* 5, 24050–24058, 2018.
- [151] KUMAR, M.N.; ABHIRAM, K.; CHAUHAN, M. S.; SAISUDHA, P. Experimental Investigation on Mechanical Properties of Engineered

- Cementitious Composites, *Civil Engineering and Architecture*, 10, 2022, 3091 – 3096.
- [152] KURNIATI, E.O.; PEDERSON, F.; KIM, H-J. Application of steel slags, ferronickel slags, and copper mining waste as construction materials: A review. *Resources, Conservation & Recycling* 198, 2023, 107175.
- [153] LABORATÓRIO DE INSTRUMENTAÇÃO ELETRÔNICA E TÉCNICAS ANALÍTICAS (LIETRA). Caracterização de amostras de resíduos através da técnica de Fluorescência de raios X. *Laboratório de Instrumentação Eletrônica e Técnicas Analíticas*, 2023.
- [154] LACHANCE, G. R.; CLAISSE, F. Quantitative X-ray Fluorescence analysis: Theory and Application. 1 ed., New York: John Willey & Sons, 1995.
- [155] LAGE, F. L.; GONÇALVES, K. DE M.; CORDEIRO, J.; LAGE, M. A. Utilização dos rejeitos de minério de ferro na construção civil: uma análise cienciométrica. *Research, Society and Development*, 9, 2020, 94942871.
- [156] LEHNE, J.; PRESTON, F. Making concrete change, *Innovation in Low-carbon, Cement and Concrete*, Chatham House, 2018.
- [157] LEI Nº 12.305, DE 2 DE AGOSTO DE 2010, Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei no 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. Brasília, 2 de agosto de 2010; 189º da Independência e 122º da República.
- [158] LEI Nº 13.540, DE 18 DE DEZEMBRO DE 2017. Conversão da Medida Provisória nº 789, de 2017. Altera as Leis n º 7.990, de 28 de dezembro de 1989, e 8.001, de 13 de março de 1990, para dispor sobre a Compensação Financeira pela Exploração de Recursos Minerais (CFEM). Brasília, 18 de dezembro de 2017; 196º da Independência e 129º da República.
- [159] LEI, D. Y.; GUO, L. P.; CHEN, B.; CUROSU, I.; MECHTCHERINE, V. The connection between microscopic and macroscopic properties of ultra-high strength and ultra-high ductility cementitious composites (UHS-UHDCC), *Compos. Part B Eng.*, 164, 2019, 2019, 144–157.

- [160] LEPECH, M. A paradigm for integrated structures and materials design for sustainable transportation infrastructure, PhD thesis, University of Michigan 2006.
- [161] LEPECH, M. D.; KEOLEIAN, G. A.; QIAN, S.; LI, V. C. Design of green engineered cementitious composites for pavement overlay applications, Life-Cycle Civ. Eng. – Proc. 1st Int. Symp. Life-Cycle Civ. Eng. IALCCE '08, 2008 837–842.
- [162] LEPECH, M.D.; LI, V.C. Application of ECC for bridge deck link slabs. RILEM J. Mater. Struct. 42, 2009a, 1185–1195.
- [163] LEPECH, M.D.; LI, V.C. Water permeability of engineered cementitious composites. Cement & Concrete Composites 31, 2009b, 744–75.
- [164] LEUNG, C.K.Y.; LI, Z.; LEE, S.K.L. New technologies for the renovation and strengthening of concrete buildings – field demonstration and monitoring, Report published by the Hong Kong University of Science and Technology, Hong Kong, 2010.
- [165] LEWIS, D. G. Análise de variância. São Paulo: Editora Harbra, 1995.
- [166] LI, J.; QIU, J.; WENG, J.; YANG, E.H. Micromechanics of Engineered Cementitious Composites (ECC): A Critical Review and New Insights, Construction and Building Materials, 362, 2023, 129765.
- [167] LI, V. C. Engineered Cementitious Composites (ECC) Bendable Concrete for Sustainable and Resilient Infrastructure. Book chapter, ISBN 978-3-662-58437-8, 2019, 1-428.
- [168] LI, V.C. Advances in ECC research. Material science to application – a tribute to Surendra P. Shah. ACI Bookstore, 2002, 373–400.
- [169] LI, V.C. Engineered cementitious composites (ECC) – material, structural and durability performance. In: Nawy E, editor. Concrete construction engineering handbook. Boca Raton: CRC Press; 2007.

- [170] LI, V.C. Engineered Cementitious Composites-Tailored Composites Through Micromechanical Modeling. In: Banthia N, Bentur A and Mufti A, editors. Fiber Reinforced Concrete: Present and the Future. Canadian Society for Civil Engineering; 1998. 64-97.
- [171] LI, V.C. From micromechanics to structural engineering - the design of cementitious composites for civil engineering applications. *Journal of Structural Mechanics and Earthquake Engineering*. 10, 1993; 37-48.
- [172] LI, V.C. On engineered cementitious composites (ECC) a review of the material and its applications. *Journal of Concrete Technology*. 1, 2003, 215–230.
- [173] LI, V.C. Post-crack Scaling Relations for Fiber Reinforced cementitious composites, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 4, 1992, 41-57.
- [174] LI, V.C.; WANG, S.; WU, C. Tensile strain-hardening behavior of polyvinyl alcohol engineered cementitious composite (PVA-ECC). *ACI Mater. J.* 98, 2001, 483–492.
- [175] LI, V.C.; WU, C.; WANG, S.; OGAWA, A.; SAITO, T. Interface tailoring for strain-hardening polyvinyl alcohol-engineered cementitious composite (PVA-ECC). *ACI Mater. J.* 99, 2002, 463–472.
- [176] LI, Y.; LI, J.; YANG, E.H.; GUAN, X. Mechanism study of crack propagation in river sand Engineered Cementitious Composites (ECC). *Cement and Concrete Composites*, 128, 2022, 104434.
- [177] LIEW, M. S.; ASWIN, V.; DANYARO, K. U.; MOHAMMED, B. S.; AL-YACOUBY, A. M. Investigation of fibers reinforced engineered cementitious composites properties using quartz powder, *Materials (Basel)*., 13, 2020, 2428.
- [178] LIMA, R.M.F. ABREU, F. DE P. V. F. Characterization and concentration by selective flocculation/magnetic separation of iron ore slimes from a dam of Quadrilátero Ferrífero – Brazil. *J mater res technol.* 9, 2020, 2021–2027.

- [179] LIN, Z.; LI, V.C. Crack bridging in fiber reinforced cementitious composites with slip-hardening interfaces, *J. Mech. Phys* 45, 1997, 763–787.
- [180] LIU, H.; ZHANG, Q.; GU, C.; SU, H.; LI, V. Self-healing of microcracks in Engineered Cementitious Composites under sulfate and chloride environment, *Constr. Build. Mater.* 153, 2017a, 948–956.
- [181] LIU, H.; ZHANG, Q.; LI, V.; SU, H.; GU, C. Durability study on engineered cementitious composites (ECC) under sulfate and chloride environment, *Constr. Build. Mater.* 133, 2017b, 171–181.
- [182] LIU, Y.; CHEN, J.; YAO, S.; ZHANG, C. Study on the Resource Comprehensive Utilization of Mine Solid Waste, *Adv. Mater. Res.* 2093, 2012, 586–591.
- [183] LIU, Y.; ZHOU, X.; LV, C.; YANG, Y.; LIU, T. Use of silica fume and GGBS to improve frost resistance of ECC with high-volume fly ash, *Adv. Civil Eng.* 2018, 2018, 1– 11.
- [184] LONGHI, M.A.; ZHANG, Z.; WALKLEY, B.; RODRÍGUEZ, E.D.; KIRCHHEIM, A.P. Strategies for control and mitigation of efflorescence in metakaolin-based geopolymers. *Cement and Concrete Research* 144, 2021, 106431.
- [185] LOPES, D. F.; SILVA, A. C.; DE BARROS, M. R.; SILVA, E. M. S. Reaproveitamento de estéril de mineração como agregado graúdo para fabricação de concreto. *Tecnol. Metal. Mater. Miner.*, São Paulo, 17, 2020, 30-36.
- [186] LOTHENBACH, B.; SCRIVENER, K; HOOTON, R.D. Supplementary cementitious materials. *Cement and Concrete Research* 41, 2011, 1244–1256.
- [187] MA, H.; QIAN, S.; ZHANG, Z.; LIN, Z.; LI, V.C. Tailoring engineered cementitious composites with local ingredients, *Constr. Build. Mater.* 101, 2015, 584–595.

- [188] MAALEJ, M.; LIN, V.W.J.; NGUYEN, D.; QUEK, S.T. Engineered cementitious composites for effective strengthening of unreinforced masonry walls, *Engineering Structures*, 32, 2010, 2432-2439.
- [189] MACKLIN, M.G.; BREWER, P.A.; BALTEANU, D.; COULTHARD, T.J.; DRIGA, B.; HOWARD, A.J.; ZAHARIA, S. The long term fate and environmental significance of contaminant metals released by the January and March 2000 mining tailings dam failures in Maramures County, upper Tisa Basin, Romania. *Appl. Geochem.* 18, 2003, 241–257.
- [190] MAGALHÃES, M. S. Caracterização experimental de compósitos cimentícios reforçados com fibras de PVA: Processo de fratura, propriedades térmicas, deformações diferidas e estabilidade térmica. Tese de Doutorado/ COPPE - UFRJ, 2010.
- [191] MAGALHÃES, M. S.; FILHO, D. T.; FAIRBAIRN, E. M. R. Influence of Local Raw Materials on The Mechanical Behaviour and Fracture Process of PVA-SHCC. *Materials Research*. 17, 2014; 146-156.
- [192] MAGALHÃES, M.S.; CEZAR, B.F.; LUSTOSA, P.R. Influence of Brazilian fly ash fineness on the cementing efficiency factor, compressive strength and Young's modulus of concrete. *Developments in the Built Environment* 14, 2023, 100147.
- [193] MAI, Y. W.; COTTERELL, B. Porosity and Mechanical Properties of Cement Mortar. *Cement and Concrete Research*, V. 15, 1985, 995-1002.
- [194] MANVI, G, N.; Kumar, A. A. Evaluation of Mechanical Properties of Hybrid Engineered Cementitious Composite (HECC). *Materials Today: Proceedings* 4, 9856–9859, 2017.
- [195] MARDMOMEN, S.; CHEN, H.-L.R. Modeling the thermal and mechanical properties of early age concrete containing ground granulated blast furnace slag. *Construction and Building Materials* 401, 2023, 132902.

- [196] MARSHALL, D.B.; COX, B.N. A Integral Method for Calculating Steady-State Matrix Cracking Stresses in Composites," *Mechanics of Materials*, 7, 1988, 127-133.
- [197] MARTIN, C.; PHILIPPE, L.; ERICK, R. Efficiency of mineral admixtures in mortars Quantification of the physical and chemical effects of fine admixtures in relation with compressive strength, *Cem. Concr. Res.* 36, 2006, 264–277.
- [198] MARUTHUPANDIAN, S.; CHALIASOU, A.; KANELLOPOULOS, A. Recycling mine tailings as precursors for cementitious binders – Methods, challenges and future outlook. *Construction and Building Materials* 312, 2021, 125333.
- [199] MATSUMOTO, T. Journal of applied mechanics crack bridging law in discontinuous fiber reinforced composites under cyclic loading. *JSCE J. Appl. Mech.* 10, 2007, 923–933.
- [200] MECHTCHERINE, V.; SILVA, F.A.; BUTLER, M.; ZHU, D.; MOBASHER, B.; GAO, S.L.; MÖDER, E. Behavior of strain-hardening cement-based composites under high strain rates, *J. Adv. Concr. Technol.* 9, 2011, 51–62.
- [201] MEHTA, P.K.; MONTEIRO, P.J.M. *Concrete: Microstructure, Properties, and Materials*, 2014.
- [202] MENG, D.; HUANG, T.; ZHANG, Y. X.; LEE, C. K. Mechanical Behaviour of a Polyvinyl Alcohol Fibre Reinforced Engineered Cementitious Composite (PVA-ECC) using Local Ingredients, *Construction and Building Materials*, 141, 2017, 259-270.
- [203] MINARD, A. Bendable concrete heals itself-just add water. *National Geographic News*. National Geographic ed. National Geographic Society; 2009.
- [204] MIRCEA, A.C.; SZILAGYI, H.; HEGYI, A.; BAERA, C. Study of self-healing engineered cementitious composites for durable and sustainable infrastructure, *Procedia Manuf.* 46, 2020, 871–878.
- [205] MIRON, M., BOYD, B. W. *Iron Ore*. The Canadian Encyclopedia, 2006.

- [206] MOHAMMED, B.S.; KHED, V.C.; LIEW, M.S. Optimization of hybrid fibres in engineered cementitious composites, *Constr. Build. Mater.* 190, 2018, 24–37.
- [207] MONTGOMERY, D. C.; RUNGER, G. C. *Estatística aplicada e probabilidade para engenheiros*. Trad. Verônica Calado. Rio de Janeiro: LTC, 2014.
- [208] NAAMAN, A. E. Fiber reinforced concrete: five decades of progress. 4th Brazilian Conference on Composite Materials. Rio de Janeiro, July 22nd-25th, 2018.
- [209] NAAMAN, A. E. Toughness, ductility, surface energy and deflection-hardening FRC composites, In: *Proceedings of the JCI International Workshop on Ductile Fiber Reinforced Cementitious Composites (DFRCC) – Application and Evaluation*, 2002.
- [210] NAAMAN, A. E.; REINHARDT, H. W. Proposed Classification of FRC Composites Based on their Tensile Response” *Materials and Structures*, 39, 2006, 547–555.
- [211] NAAMAN, A.E. Advances in High Performance Fiber Reinforced cement Based composites, *Proceedings of the International Symposium on Fiber Reinforced concrete*, Oxford IBH Publishing Ltd., New Delhi, India, 1987, 7.87-7.98.
- [212] NAAMAN, A.E. Development and evolution of tensile strain hardening FRC composites, in *Fiber Reinforced Concrete: Design and Applications*, *Proceedings of International Symposium, BEFIB 2008, RILEM PRO 60*, 2008, 1-28.
- [213] NAAMAN, A.E. Engineered Steel Fibers with Optimal Properties for Reinforcement of Cement Composites. *Journal of Advanced Concrete Technology*. 1, 2003, 241-252.
- [214] NASCIMENTO, G.C.; DOMINGUINI, L.; MELLO, J.M.M.; MAGRO, J.D.; RIELLA, H.G.; FIORI, M.A. Caracterização físico-química da cinza de casca de

- arroz oriunda do processo termelétrico do sul de Santa Catarina - Brasil. *Ciência e Natura*, Santa Maria, 37, 2015, 634-640.
- [215] NATIONAL RESEARCH COUNCIL (NRC), *Coal Waste Impoundments: Risks, Responses, and Alternatives*, National Academy Press, Washington, DC, 2002.
- [216] NEDUNURI, S.S.S.A.; SERTSE, S.G.; MUHAMMAD, S. Microstructural study of Portland cement partially replaced with fly ash, ground granulated blast furnace slag and silica fume as determined by pozzolanic activity. *Construction and Building Materials* 238, 2020, 117561.
- [217] NETZSCH. Areia de gesso e de quartzo – transições de fase, 2014. Disponível em <https://www.netzsch-thermal-analysis.com/pt/materiais-aplicacoes/ceramicos-vidros/areia-de-gesso-e-de-quartzo-transicoes-de-fase.html>.
- [218] NGUYEN, H.H.; LUONG, Q.-H.; CHOI, J.-II.; RANADE, R.; LI, V.C.; LEE, B.Y. Ultra-ductile behavior of fly ash-based engineered geopolymer composites with a tensile strain capacity up to 13.7%. *Cement and Concrete Composites* 122, 2021, 104133.
- [219] NGUYEN, V.M.; PHUNG, T.B.; PHAM, D.T.; HO, L. S. Mechanical properties and durability of concrete containing coal mine waste rock, F-class fly ash, and nano-silica for sustainable development, *Journal of Engineering Research*, 11, 2023, 75-86.
- [220] Norma Reguladora de Mineração (NRM) nº 19 de 2001. Disposição de Estéril, Rejeitos e Produtos. In Portaria DNPM nº 237 de 18/10/2001. Aprova as Normas Reguladoras de Mineração - NRM, de que trata o art. 97 do Decreto-lei nº 227, de 28 de fevereiro de 1967, Brasília, 2001.
- [221] OLIVEIRA, A. M. DA S.; RIBEIRO, D. F.; GONZAGA, L. G. DAS M. Utilização do método anova em amostras de concreto leve com pérolas de EPS: uma abordagem didática voltada para o ensino de estatística nos cursos de graduação em engenharia. *Revista de Ensino de Engenharia*, v. 41, p. 3-15, 2022.

- [222] OLIVEIRA, T.M.; GENEROSO, F.J.; DA SILVA, T.O.; SANT'ANNA, G.L.; SILVA, C.H.D.C.; PITANGA, H.N. Geomechanical properties of mixtures of iron ore tailings improved with Portland cement. *Acta Sci. Technol.* 41, 2019, 38038.
- [223] PAN, Z.; WU, C.; LIU, J.; WANG, W.; LIU, J. Study on mechanical properties of cost-effective polyvinyl alcohol engineered cementitious composites (PVA-ECC). *Construction and Building Materials* 78, 2015, 397–404.
- [224] PEDROSO, D. E. Utilization of iron ore tailings in composites for civil construction. Tese (doutorado na área de Construção Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2020.
- [225] PEREIRA, O.C.; BERNARDIN, A.M. Ceramic colorant from untreated iron ore residue. *Journal of Hazardous Materials* 233–234, 2012, 103–111.
- [226] PERNER, K.; LEIPE, T.; DELLWIG, O.; KUIJPERS, A.; MIKKELSEN, N.; ANDERSEN, T.J.; HARFF, J. Contamination of arctic Fjord sediments by Pb-Zn mining at Maarmorilik in central West Greenland. *Mar. Pollut. Bull.* 60, 2010, 1065–1073.
- [227] PINTO, S.S.DES. Caracterização das propriedades físicas e mecânicas de diferentes tipos de rejeito para aplicação em pavimentos. Universidade Federal de Viçosa, 2013.
- [228] PIR, "Panorama de los Recursos Globales 2019: Recursos naturales para el futuro que queremos," Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente, Nairobi, 2019.
- [229] POONGODI, K.; SRAVANTHI, M.; MURTHI, P. A review report on Performance Evaluation of Engineered Cementitious Composites (ECC) in structural applications. *Materials Today: Proceedings* 68, 2022, 1349–1354.
- [230] PRASHANTHI, R.; NATARAJAN, K. Engineered cementitious composites - a review, *Materials Today: Proceedings*, <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.04.054>

- [231] PROTASIO, F. N. M.; DE AVILLES, R. R.; LETICHEVSKY, S.; DE SILVA, F. DE A. The use of iron ore tailings obtained from the Germano dam in the production of a sustainable concrete. *Journal of Cleaner Production* 278, 2021, 123929.
- [232] RADIC, R.; MILOSEVIC; JURIC, S.; CUDI, S. Flotation of ores and waste waters. *Metalurgija* 55, 2016, 832–834.
- [233] RANADE, R. Advanced Cementitious Composite Development for Resilient and Sustainable Infrastructure. University of Michigan, Ann Arbor 2014.
- [234] RANGEL, R.C. Avaliação do uso de blendas de cinza volante e metacaulinita nas propriedades físicas, mecânicas e desgaste por erosão de compósitos cimentícios do tipo strain hardening. 2023. 150f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2023.
- [235] RAZAVI, S.M.; NAZARPOUR, H.; BEYGI, M. H. Investigation of the efficacy of nano-silica on mechanical properties of Green-Engineered Cementitious Composite (GECC) containing high volume natural zeolite, *Constr. Build. Mater.* 291, 2021, 123246.
- [236] RECOMENDAÇÃO Nº 0 14 /2016-MPF-GAB/FT, Inquérito Civil nº: 1.22.010.000246/2015-34. Objeto: Apurar danos ambientais decorrentes do rompimento da barragem de rejeitos de Fundão em Mariana/MG. Ementa da recomendação: DNPM. Mineração Sustentável. Destinação ambientalmente adequada de rejeitos de mineração. Belo Horizonte/MG, 18 de março de 2016.
- [237] REN, G.; YAO, B.; HUANG, H.; GAO, X. Influence of sisal fibers on the mechanical performance of ultra-high performance concretes, *Constr. Build. Mater.* 286, 2021, 122958.
- [238] RIGET, F.; JOHANSEN, P.; ASMUND, G. Uptake and release of lead and zinc by blue mussels. Experience from transplantation experiments in Greenland. *Mar. Pollut. Bull.* 34, 1997, 805–815.

- [239] ROKUGO, K. Strain-hardening cement-based composites. In: SHCC4, 15, 2018, 671–680.
- [240] ROKUGO, K.; KANDA, T. Strain Hardening Cement Composites: Structural Design and Performance, vol. 6. RILEM, 2013.
- [241] ROKUGO, K.; KANDA, T.; YOKOTA, H.; SAKATA, N. Applications and recommendations of high performance fiber reinforced cement composites with multiple fine cracking (HPFRCC) in Japan. *Mater. Struct.* 42, 2009, 1197–1208.
- [242] ROKUGO, K.; UCHIDA, Y.; MORIYAMA, M. LIM, S.-C. Direct tensile behavior and size effect of strain-hardening fiber-reinforced cement-based composites (SHCC), In: 6th International Conference on Fracture Mechanics of Concrete and Concrete Structures, 2007.
- [243] SABAPATHY, L.; MOHAMMED, B.S.; AL-FAKIH, A., WAHAB, M.M.A.; LIEW, M.S., AMRAN, Y.H. M. Acid and sulphate attacks on a rubberized engineered cementitious composite containing graphene oxide, *Materials (Basel)* 13, 2020, 3125.
- [244] SAHMARAN, M.; LACHEMI, M.; HOSSAIN, K.M.A.; RANADE, R.; LI, V.C. Influence of Aggregate Type and Size on Ductility and Mechanical Properties of Engineered Cementitious Composites. *ACI Materials Journal*. 106, 2009, 308-316.
- [245] SAHMARAN, M.; LI, V.C. Durability of mechanically loaded engineered cementitious composites under highly alkaline environment. *Cem Concr Comp*, 30, 2008, 72–8.
- [246] SAHMARAN, M.; LI, V.C.; ANDRADE, C. Corrosion resistance performance of steelreinforced engineered cementitious composite beams. *ACI Mater J* 105, 2008, 243–50.
- [247] SAHMARAN, M.; ÖZBAY, E.; E. YÜCEL, H.E.; LACHEMI, M.; LI, V.C. Frost resistance and microstructure of Engineered Cementitious Composites: Influence of fly ash and micro poly-vinyl-alcohol fiber. *Cement & Concrete Composites* 34, 2012, 156–165.

- [248] SAHMARAN, M.; YILDIRIM, G.; ERDEM, T.K. Self-healing capability of cementitious , composites incorporating different supplementary cementitious materials. *Cem. Concr. Compos.* 35, 2013, 89101.
- [249] SAHMARAN, M.; YILDIRIM, G.; NOORI, R.; OZBAY, E.; LACHEMI, M. Repeatability and pervasiveness of self-healing in engineered cementitious composites. *ACI Mater. J.* 112, 2015, 513522.
- [250] SAHMARAN, M.; YILDIRIM, G.; OZBAY, E.; AHMED, K.; LACHEMI, M. Self-healing ability of cementitious composites: effect of addition of pre-soaked expanded perlite. *Mag. Concr. Res.* 66, 2014, 409419.
- [251] SAID, S.H.; RAZAK, H.A. The effect of synthetic polyethylene fiber on the strain hardening behavior of engineered cementitious composite (ECC), *Mater. Des.* 86, 2015a, 447–457.
- [252] SAID, S.H.; RAZAK, H.A.; OTHMAN, I. Flexural behavior of engineered cementitious composite (ECC) slabs with polyvinyl alcohol fibers, *Constr. Build. Mater.* 75, 2015b, 176–188.
- [253] SAKO, A.; SEM DE, S.; WENMENGA, U. Geochemical evaluation of soil, surface water and groundwater around the Tongon gold mining area, northern Cote d'Ivoire, West Africa, *Journal of African Earth Sciences* 145, 2018, 297-316.
- [254] SANDEEP, Y.; AMBIKA, B. Experimental Investigation on Bendable Concrete, *Int. Res. J. Eng. Technol.* 6, 2019, 1308–1317.
- [255] SANT'ANA FILHO, J. N. Estudo de reaproveitamento dos resíduos das barragens de minério de ferro para fabricação de blocos Inter travados de uso em pátios industriais e alto tráfico. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) CEFET, Belo Horizonte, 2013, 130f.
- [256] SANTANA, L. G. L. Estudo de compósitos cimentícios do tipo SHCC com o uso da metacaulinita e a sua avaliação quando utilizado no confinamento de concretos. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de

- Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2023, 179f.
- [257] SANTOS, S. F. Evaluation of the energy of fracture in ceramic materials at high temperatures.. 2005. 226 f. Tese (Doutorado em Ciências Exatas e da Terra) - Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2005.
- [258] SCHUTTER, G.D. Effect of limestone filler as mineral addition in self-compacting concrete, in: 36th Conference on our World in Concrete & Structures, Singapore 14–16, 2011.
- [259] SCRIVENER, K.L.; JUILLAND, P.; MONTEIRO, P.J.M. Advances in understanding hydration of Portland cement. *Cement and Concrete Research* 78, 2015a, 38–56.
- [260] SCRIVENER, K.L.; LOTHENBACH, B.; BELIE, N.D.; GRUYAERT, E.; SKIBSTED, R.; SNELLINGS, J.; VOLLPRACHT, A. TC 238-SCM: hydration and microstructure of concrete with SCMs – State of the art on methods to determine degree of reaction of SCMs, *Mater. Struct.* 48, 2015b, 835–862.
- [261] SEERIG, T. ESTÉREIS EM MINAS DE MINÉRIO DE FERRO: SUA CARACTERIZAÇÃO COMO MATERIAL POZOLÂNICO APÓS CALCINAÇÃO EM FORNO FLASH. Dissertação (mestrado). Universidade Federal de Minas Gerais, 2019.
- [262] SEERIG, T.; BRANDÃO, P.R.G.; GAMA, E.M. CARACTERIZAÇÃO DE ESTÉRIL DE MINERAÇÃO DE FERRO PARA USO COMO MATÉRIA-PRIMA PARA PRODUÇÃO DE POZOLANA. XXVIII Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa Belo Horizonte-MG, 2019.
- [263] SHAMSI, M.; ZAKERINEJAD, M. Production of sustainable hot mix asphalt from the iron ore overburden residues. *Transportation Research Part D* 123, 2023, 103926.
- [264] SHANMUGASUNDARAM, N.; PRAVEENKUMA, S. Influence of supplementary cementitious materials, curing conditions and mixing ratios on

- fresh and mechanical properties of engineered cementitious composites – A review. *Construction and Building Materials* 309, 2021a, 125038.
- [265] SHANMUGASUNDARAM, N.; PRAVEENKUMA, S. Mechanical Properties of Engineered Cementitious Composites Incorporating different mineral admixtures and fiber – A Review. *ACTM2021_05_182*, 2021b, 1–15.
- [266] SHERIR, M.A.A.; HOSSAIN, K.M.A.; LACHEMI, M. Structural performance of polymer fiber reinforced engineered cementitious composites subjected to static and fatigue flexural loading, *Polymers (Basel)* 7, 2015, 1299–1330.
- [267] SHETTIMA, A.U.; HUSSIN, M.W.; AHMAD, Y.; MIRZA, J. Evaluation of iron ore tailings as replacement for fine aggregate in concrete. *Construction and Building Materials* 120, 2016, 72–79.
- [268] SHOJI, D.; HE, Z.; ZHANG, D.; LI, V. C. The greening of engineered cementitious composites (ECC): A review. *Construction and Building Materials* 327, 2022, 126701.
- [269] SIAD, H.; ALYOUSIF, A.; KESKIN, O.K.; KESKIN, S.B.; LACHEMI, M.; SAHMARAN, M.; HOSSAIN, K.M. A. Influence of limestone powder on mechanical, physical and self-healing behavior of Engineered Cementitious Composites, *Constr. Build. Mater.* 99, 2015, 1–10.
- [270] SIAD, H.; LACHEMI, M.; SAHMARAN, M.; MESBAH, H.A.; HOSSAIN, K.M.A. Use of recycled glass powder to improve the performance properties of high volume fly ash engineered cementitious composites, *Constr. Build. Mater.* 163, 2018, 53–62.
- [271] SILVA, D.C. Influência do teor de metacaulinita na avaliação da aderência de compósitos cimentícios reforçados com fibras, como reparo de estruturas de concreto. *Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2023.*

- [272] SILVA, J. H. G. Caracterização Física, Química e Mecânica do Cimento Portland CPV-ARI de Fábricas da Região Nordeste. Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Coordenação de Engenharia de Materiais. João Pessoa, 2019.
- [273] SIM, S.; RHEE, J.H.; OH, J.E.; KIM, G. Enhancing the durability performance of thermally damaged concrete with ground-granulated blast furnace slag and fly ash. *Construction and Building Materials* 407, 2023, 133538.
- [274] SIMONSEN, A. M. T.; SOLISMAA, S.; HANSEN, H. K.; JENSEN, P. E. Evaluation of mine tailings potential as supplementary cementitious materials based on chemical, mineralogical and physical characteristics. *Waste Management* 102, 2020, 710–721.
- [275] SINGH, M.; SAINI, B.; CHALAK, H.D. Appraisal of hybrid fiber reinforced engineered cementitious composite, *Int. Conf. Civil, Struct. Transp . Eng (ICCSTE'19)*. 2019, 1–8.
- [276] SINGH, M.; SAINI, B.; CHALAK, H.D. Long term evaluation of engineered cementitious composite containing stone slurry powder, *Constr. Build. Mater.* 264, 2020, 120183.
- [277] SOARES, S. M. M. N. Influência das condições de queima nas características físico-químicas das cinzas do bagaço de cana-de-acúcar. Dissertação de M.Sc., UFMG, Belo Horizonte, MG, Brasil, 2010.
- [278] SRIKAKULAM, L.M.; KHED, V.C. Experimental investigation on the strength parameters of rubberized engineered cementitious composite with M sand, *Mater. Today Proc.* 27, 2020, 1230–1234.
- [279] SRINIVASA, C. H.; VENKATESH. A Literature Review on Engineered Cementitious Composites for Structural Applications *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)* IJERT ISSN: 2278-0181 IJERTV3IS120448, 3, 2014.

- [280] STECHSHYN, M.; SANYTSKY, M.; POZNYAK, O. Durability properties of high volume fly ash self-compacting fiber reinforced concretes. *Eastern-Eur. J. Enterp. Technol.* 3, 2015, 49–53.
- [281] SUBEDI, S.; ARCE, G. A.; HASSAN, M. M., BARBATO, M.; MOHAMMAD, L. N.; RUPNOW, T. Feasibility of ECC with high contents of post-processed bagasse ash as partial cement replacement. *Construction and Building Materials* 319 126023, 2022.
- [282] SYDOR, N.; MARUSHCHAK, U.; BRAICHENKO, S.; RUSYN, B. Development of component composition of engineered cementitious composites. In: Blikharsky, Z. (ed.) *EcoComfort 2020. Lecture Notes in Civil Engineering*, 100, 2021, 459–465.
- [283] TASHIMA, M.M.; FIORITI, C.F.; AKASAKI, J.A.; BERNABEU, J.P.; SOUSA, L.C.; MELGES, J.L.P. Cinza de casca de arroz (CCA) altamente reativa: método de produção e atividade pozolânica. *Ambient. constr.* 12, 2012.
- [284] TAVARES, L.D. DA C.; BRANDÃO, P.R.G. Rejeito de minério de ferro depositado em barragem: caracterização para definição de processo para reciclagem econômica. *Tecnol Metal Mater Min.* 19, 2022, 2676.
- [285] THOMAS, B.S., DAMARE, A., GUPTA, R.C. Strength and durability characteristics of copper tailing concrete. *Construction and Building Materials*, 48, 894-900, 2013.
- [286] UNITED STATE GEOLOGICAL SURVEY (USGS). National minerals information center e mineral commodity summaries. 2019.
- [287] VASSILEV, S.V.; BAXTER, D.; ANDERSEN, L.K.; VASSILEVA, C.G. An overview of the chemical composition of biomass. *Fuel*, 89, 2010, 913–33.
- [288] VIEIRA, A. V. R. Avaliação dos Possíveis Impactos Ambientais Negativos Decorrentes da Instalação do Aterro Sanitário Industrial e dos Lagos de Resíduos de Bauxita: Parque Industrial – Alumar/Alcoa São Luís – MA. Mestrado. Universidade de São Paulo, São Paulo, 2001.

- [289] VILELA, A.P.; EUGÊNIO, T.M.C; DE OLIVEIRA, F.F.; MENDES, J.F.; RIBEIRO, A.G.C; VAZ, L.E.V.S.; MENDES, R.F. Technological properties of soil-cement bricks produced with iron ore mining waste. *Construction and Building Materials* 262, 2020, 120883.
- [290] VISEDO, G.; PECCHIO, M. Roadmap tecnológico do cimento: potencial de redução das emissões de carbono da indústria do cimento brasileira até 2050. Rio de Janeiro: SNIC, 2019, 64 p.
- [291] VITAL, P. de O. Durabilidade de compósitos cimentícios reforçados com fibras de PVA frente ao ataque de sulfato de sódio e de magnésio. 2023. 241 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2023.
- [292] WANG, C.L.; ZHANG, W. NI, S.Q.; WANG, S.; GAI, G.-S.; WANG, W.-K. Preparation and properties of autoclaved aerated concrete using coal gangue and iron ore tailings, *Constr. Build. Mater.* 104, 2016, 109–115.
- [293] WANG, D.; SHI, C.; FARZADNIA, N.; SHI, Z.; JIA, H.; OU, Z. A review on use of limestone powder in cement-based materials: Mechanism, hydration and microstructures. *Construction and Building Materials* 181, 2018, 659–672.
- [294] WANG, H.; WANG, Y.; LI, W.; QIAO, J. Report on Conservation and Comprehensive Utilization of Mineral Resources in China, Geological Press, Beijing, 2019a.
- [295] WANG, L.; ASLANI, F.; HAJIRASOULIHA, I.; ROQUINO, E. Ultra-lightweight engineered cementitious composite using waste recycled hollow glass microspheres, *J. Clean. Prod.* 249, 2020a, 119331.
- [296] WANG, Q.; LAI, M.H.; ZHANG, J.; WANG, Z.; HO, J.C.M. Greener engineered cementitious composite (ECC) – the use of pozzolanic fillers and uncoiled PVA fibers, *Constr. Build. Mater.* 247, 2020b, 118211.
- [297] WANG, Q.; YI, Y.; MA, G.; LUO, H. Hybrid effects of steel fibers, basalt fibers and calcium sulfate on mechanical performance of PVA-ECC containing high-volume fly ash. *Cement and Concrete Composites* 97, 2019b, 357–368.

- [298] WANG, Q.; ZHANG, J.; HO, J.C.M. Zeolite to improve strength-shrinkage performance of high-strength engineered cementitious composite, *Constr. Build. Mater.* 234, 2020c, 117335.
- [299] WANG, S. *Micromechanics Based Matrix Design for Engineered Cementitious Composites*. University of Michigan, Ann Arbor, 2005.
- [300] WANG, S.; LI, V.C. Engineered cementitious composites with high volume fly ash. *ACI Mater. J.* 104, 2007, 233–241.
- [301] WANG, S.X.; LI, V.C. Polyvinyl alcohol fiber reinforced engineered cementitious composites: materials design and performances. In: *Int'l Workshop on HPCFRCC Structural Applications*, 2005, 65–73.
- [302] WANG, Y.; LIU, F.; YU, J.; DONG, F.; YE, J. Effect of polyethylene fiber content on physical and mechanical properties of engineered cementitious composites, *Constr. Build. Mater.* 251, 2020d, 118917.
- [303] WANG, Y.; ZHANG, Z.; YU, J.; XIAO, J.; XU, Q. Using green supplementary materials to achieve more ductile ECC, *Materials (Basel)* 16, 2019c, 858.
- [304] WANG, Z.; ZUO, J.; ZHANG, X.; JIANG, G.; FENG, L. Stress-strain behaviour of hybrid-fibre engineered cementitious composite in compression, *Adv. Cem. Res.* 32, 2020e, 53–65.
- [305] WEIMANN, M. B.; LI, V. C. Hygral Behavior of Engineered Cementitious Composite (ECC). *International Journal for Restoration of Buildings and Monuments* 9, 2003, 513–534.
- [306] WITTMANN, F.H.; WILHELM, T.; BELTZUNG, F.; GRÜBL, P. Multi-crack formation in strain hardening cement-based composites. In: Reinhardt HW, Naaman AE, editors. *Fifth international RILEM workshop on high performance fiber reinforced cement composites (HPCFRCC5)*, Paris, France; 2007. 125–34.

- [307] WOLFF, A. P. Caracterização de rejeitos de minério de ferro de minas da Vale, Dissertação Mestrado, Ouro Preto: Universidade Federal de Ouro Preto, 2009.
- [308] WOLKERSDORFER, C.; BOWELL, R. Contemporary reviews of mine water studies in Europe, *Mine Water Environ.* 23, 2004, 161.
- [309] WORLANYO, A.S.; JIANGFENG, L. Evaluating the environmental and economic impact of mining for post-mined land restoration and land-use: a review. *J. Environ. Manag.* 279, 2021, 111623.
- [310] WORLD INFORMATION SERVICE ON ENERGY (Wise) Uranium. Chronology of major tailings dam failures. WISE Uranium Project. (2019). Acesso em 15 de junho de 2019 em <http://www.wiseuranium.org/mdaf.htm>
- [311] XIONG, X.; YANG, Z.; YAN, X.; ZHANG, Y.; DONG, S.; LI, K.; BRISEGHELLA, B.; MARANO, G.C. Mechanical properties and microstructure of engineered cementitious composites with high volume steel slag and GGBFS. *Construction and Building Materials* 398, 2023, 132512.
- [312] XU, L.Y.; HUANG, B.T.; DAI, J.G. Development of engineered cementitious composites (ECC) using artificial fine aggregates, *Constr. Build. Mater.* 305, 2021a, 124742.
- [313] XU, M.; SONG, S.; FENG, L.; ZHOU, J.; LI, H.; LI, V.C. Development of basalt fiber engineered cementitious composites and its mechanical properties, *Constr. Build. Mater.* 266, 2021b, 121173.
- [314] XU, S.; REINHARDT, H. W. Determination of double-K criterion for crack propagation in quasi-brittle fracture, Part II: analytical evaluating and practical measuring methods for three-point bending notched beams, *Int. J. Fract.* 98 (2), 151–177, 1999.
- [315] YAN, P.; CHEN, B.; AFGAN, S.; HAQUE, M. A.; WU, M.; HAN, J. Experimental research on ductility enhancement of ultra-high performance concrete incorporation with basalt fibre, polypropylene fibre and glass fibre, *Constr. Build. Mater.* 279, 2021, 122489.

- [316] YANG, C.; CUI, C.; QIN, CUI, X. Characteristics of the fired bricks with low-silicon iron tailings, *Constr. Build. Mater.* 70, 2014, 36–42.
- [317] YANG, C.; CUI, C.; QIN, J. Recycling of low-silicon iron tailings in the production of lightweight aggregates. *Ceramics International* 41, 2015, 1213–122.
- [318] YANG, E. *Designing Added Functions in Engineered Cementitious Composites*. University of Michigan, Ann Arbor, 2008.
- [319] YANG, E.-H.; LI, V.C. Strain-rate effects on the tensile behavior of strain-hardening cementitious composites, *Constr. Build. Mater.* 52, 2014, 96–104.
- [320] YANG, E.-H.; LI, V.C. Tailoring engineered cementitious composites for impact resistance, *Cem. Concr. Res.* 42, 2012, 1066–1071.
- [321] YANG, L.; QIU, J.; JIANG, H.; HU, S.; LI, H.; LI, S. Use of cemented super-fine unclassified tailings backfill for control of subsidence, *Minerals*. 7, 2017, 21.
- [322] YAO, G.; WANG, Q.; WANG, Z.; WANG, J.; LYU, X. Activation of hydration properties of iron ore tailings and their application as supplementary cementitious materials in cement *Powder Technology* 360, 2020, 863–871.
- [323] YELLISHETTY, M.; KARPEB, V.; REDDYB, E.H.; SUBHASHB, K.N.; RANJITHA, P.G. Reuse of iron ore mineral wastes in civil engineering constructions: a case study. *Resour Conserv Recycl*, 52, 2008, 1283-89.
- [324] YILDIRIM, G.; SAHMARAN, M.; AHMED, H.U. Influence of hydrated lime addition on the self-healing capability of high-volume fly ash incorporated cementitious composites. *ASCE J. Mater. Civ. Eng.* 27, 2014, 04014187.
- [325] YILDIRIM, G.; SAHMARAN, M.; ANIL, O. *Eco-efficient Repair and Rehabilitation of Concrete Infrastructures*. Engineered cementitious composites-based concrete. 2018, 387-427.
- [326] YIN, S.; YAN, Z.; CHEN, X.; YAN, R.; CHEN, D.; CHEN, J. Mechanical properties of cemented tailings and waste-rock backfill (CTWB) materials:

- Laboratory tests and deep learning modeling. *Construction and Building Materials* 369, 2023, 130610.
- [327] YU, J.; CHEN, Y.; LEUNG, C. K. Y.; Mechanical performance of Strain-Hardening Cementitious Composites (SHCC) with hybrid polyvinyl alcohol and steel fibers, *Compos. Struct.*, 226, 2019a, 111198.
- [328] YU, J.; WU, H.-L.; LEUNG, C.K.Y. Feasibility of using ultrahigh-volume limestone-calcined clay blend to develop sustainable medium-strength Engineered Cementitious Composites (ECC), *J. Clean. Prod.* 262, 2020 121343.
- [329] YU, K. Q.; ZHU, W. J.; DING, Y.; LU, Z. D.; TAO YU, J.; XIAO, J. Z. Micro-structural and mechanical properties of ultra-high performance engineered cementitious composites (UHP-ECC) incorporation of recycled fine powder (RFP),” *Cem. Concr. Res.*, 124, 2019b, 105813.
- [330] YU, K.; LI, L.; YU, J.; WANG, Y.; YE, J.; XU, Q. Direct tensile properties of engineered cementitious composites: A review. *Construction and Building Materials* 165, 2018a, 346–362.
- [331] YU, K.Q.; DAI, J.G.; LU, Z.D.; POON, C.S. Rate-dependent tensile properties of ultra-high performance engineered cementitious composites (UHP-ECC), *Cem. Concr. Compos.* 93, 2018b, 218–234.
- [332] YU, K.-Q.; YU, J.-T.; DAI, J-G.; LU, Z.-D.; SHAH, S.P. Development of ultra-high performance engineered cementitious composites using polyethylene (PE) fibers. *Constr. Build. Mater.* 158, 2018c, 217–227.
- [333] YUAN, X.; XU, K. Advances in solid waste treatment and disposal technology for china’s metal mines, *Met. Mine.* 6, 2004, 46–49.
- [334] YUNHONG, C.; FEI, H.; WENCHUAN, L.; RUI, L.; GUANGLU, L.; JINGMING, W. Test research on the effects of mechanochemically active iron tailings on the compressive strength of concrete; *Constr. Build. Mater.* 118, 2016, 164-170.

- [335] ZAREEI, S.A.; AMERI, F.; BAHRAMI, N. Microstructure, strength, and durability of eco-friendly concretes containing sugarcane bagasse ash. *Constr Build Mater*, 184, 2018, 258-268.
- [336] ZHANG, D.; JAWORSKA, B.; ZHU, H.; DAHLQUIST, K.; LI, V.C. Engineered Cementitious Composites (ECC) with limestone calcined clay cement (LC3), *Cem. Concr. Compos.* 114, 2020a, 103766.
- [337] ZHANG, J. External Building Wall with Thermal Insulation and Pre-cast Fiber Reinforced ECC Panels. Report published by Tsinghua University Civil Engineering Department, China, 2014.
- [338] ZHANG, N.; TANG, B.; LIU, X. Cementitious activity of iron ore tailing and its utilization in cementitious materials, bricks and concrete. *Construct. Build. Mater.* 288, 2021, 123022.
- [339] ZHANG, X.; GU, J.; QIU, J.; LIU, Y.; ZHAO, X.; LI, V. Effects of iron ore tailings on the compressive strength and permeability of ultra-high performance concrete. *Construction and Building Materials* 260, 2020b, 119917.
- [340] ZHANG, Y.; MA, Z.; ZHI, X.; CHEN, X.; ZHOU, J.; WEI, L.; LIU, Z. Damage characteristics and constitutive model of phosphogypsum/fly ash/slag recycled aggregate concrete under uniaxial compression. *Cement and Concrete Composites* 138, 2023, 104980.
- [341] ZHANG, Z.; YANG, F.; LIU, J.-C.; WANG, S. Eco-friendly high strength, high ductility engineered cementitious composites (ECC) with substitution of fly ash by rice husk ash, *Cem. Concr. Res.* 137, 2020c, 106200.
- [342] ZHAO, D; WANG, C; LI, K; ZHANG, P; CONG, L; CHEN, D. An Experimental and Analytical Study on a Damage Constitutive Model of Engineered Cementitious Composites under Uniaxial Tension. *Materials.* 15, 2022; 6063.
- [343] ZHAO, N.; WANG, S.; WANG, C.; QUAN, X.; YAN, Q.; LI, B. Study on the durability of engineered cementitious composites (ECCs) containing high-

- volume fly ash and bentonite against the combined attack of sulfate and freezing-thawing (F-T), *Constr. Build. Mater.* 233, 2020, 117313.
- [344] ZHAO, P.Z.; KANG, S.B.; YANG, B. Shear strength of engineered cementitious composites under push-off loads, *Procedia Eng.* 210, 2017, 53–60.
- [345] ZHAO, S.; FAN, J.; SUN, W. Utilization of iron ore tailings as fine aggregate in ultra-high performance concrete. *Construction and Building Materials* 50, 2014, 540–548.
- [346] ZHAO, Y.; QIU, J.; MA, Z. Temperature-dependent rheological, mechanical and hydration properties of cement paste blended with iron tailings. *Powder Technology* 381, 2021, 82–91.
- [347] ZHENG, Y.C.; LI, Q.; LIU, Y.J. Mine tailing as alternative to clay for producing belite cement clinker, *Adv. Mater. Res.* 726-731, 2013, 2704–271
- [348] ZHOU, J.; PAN, J.; LEUNG, C.K.Y. Mechanical behavior of fiber-reinforced engineered cementitious composites in uniaxial compression. *J. Mater. Civ. Eng.* 27, 2015, 04014111.
- [349] ZHOU, J.; QIAN, S.; YE, G.; COPUROGLU, O.; VAN BREUGEL, K.; LI, V.C. Improved fiber distribution and mechanical properties of engineered cementitious composites by adjusting mixing sequence. *J. Cem. Concr. Compos.* 34, 2012, 342–348.
- [350] ZHOU, Y.; GONG, G.; HUANG, Y.; CHEN, C.; HUANG, D.; CHEN, Z.; GUO, M. Feasibility of incorporating recycled fine aggregate in high performance green lightweight engineered cementitious composites, *J. Clean. Prod.* 280, 2021a, 124445.
- [351] ZHOU, Y.; ZHENG, S.; HUANG, X.; XI, B.; HUANG, Z.; GUO, M. Performance enhancement of green high-ductility engineered cementitious composites by nano-silica incorporation, *Constr. Build. Mater.* 281, 2021b, 122618.

- [352] ZHU, H.; ZHANG, D.; WANG, T.; WU, H.; LI, V.C. Mechanical and self-healing behavior of low carbon engineered cementitious composites reinforced with PP-fibers, *Constr. Build. Mater.* 259, 2020, 119805.
- [353] ZHU, N. *Solid waste treatment and utilization*, Peking University Press, Beijing, 2006.
- [354] ZHU, Q.; YUAN, Y.-X.; CHEN, J.H.; FAN, L.; YANG, H. Research on the high-temperature resistance of recycled aggregate concrete with iron tailing sand. *Construction and Building Materials* 327, 2022, 126889.
- [355] ZHU, Y.; YANG, Y.; YAO, Y. Use of slag to improve mechanical properties of engineered cementitious composites (ECCs) with high volumes of fly ash, *Constr. Build. Mater.* 36, 2012, 1076–1081.
- [356] ZUCCHERATTE, A. C. V.; FREIRE, C. B.; LAMEIRAS, F. S. Synthetic gravel for concrete obtained from sandy iron ore tailing and recycled polyethylthephtalate. *Constr. Build. Mater.* 151, 2017, 859-865.

APÊNDICE – REGISTRO FOTOGRÁFICO

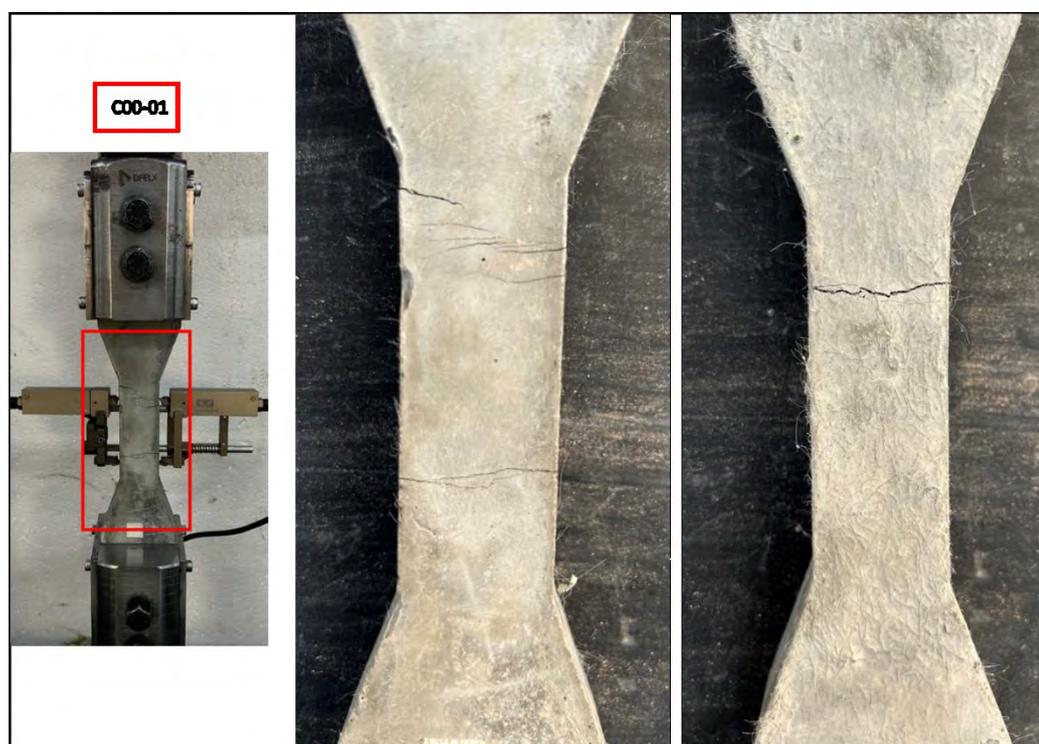


Figura 125 – Registro fotográfico – Ensaio de tração direta do corpo de prova C00-01
(Fonte: A autora, 2024).

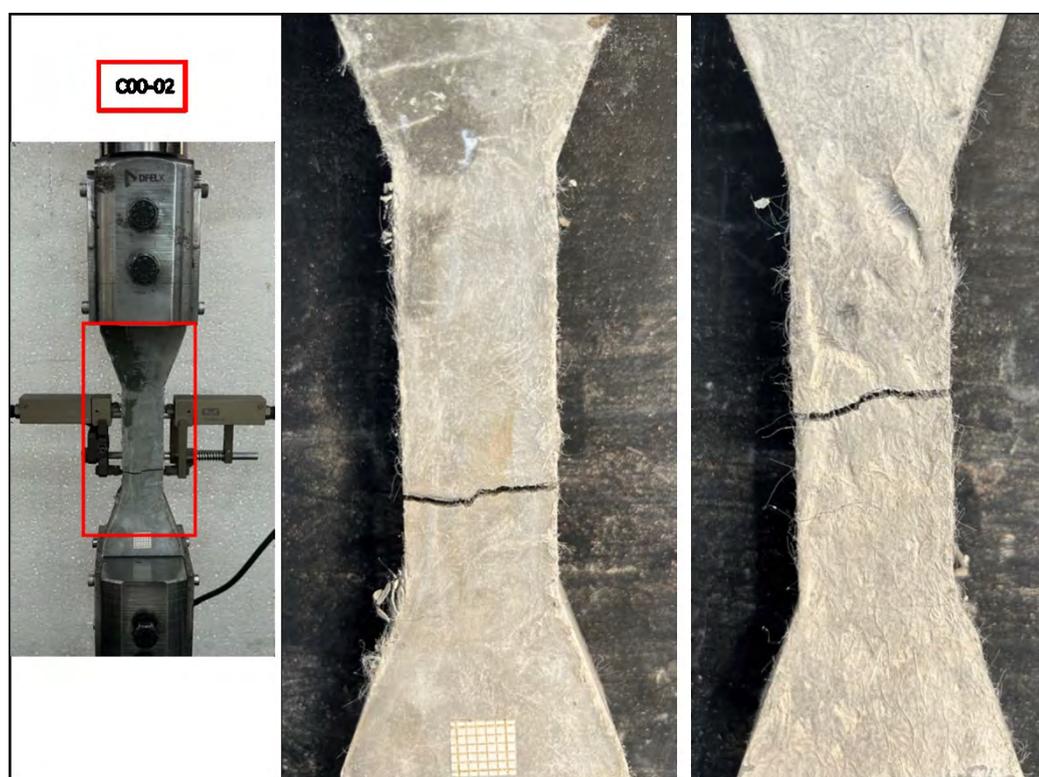


Figura 126 – Registro fotográfico – Ensaio de tração direta do corpo de prova C00-02
(Fonte: A autora, 2024).

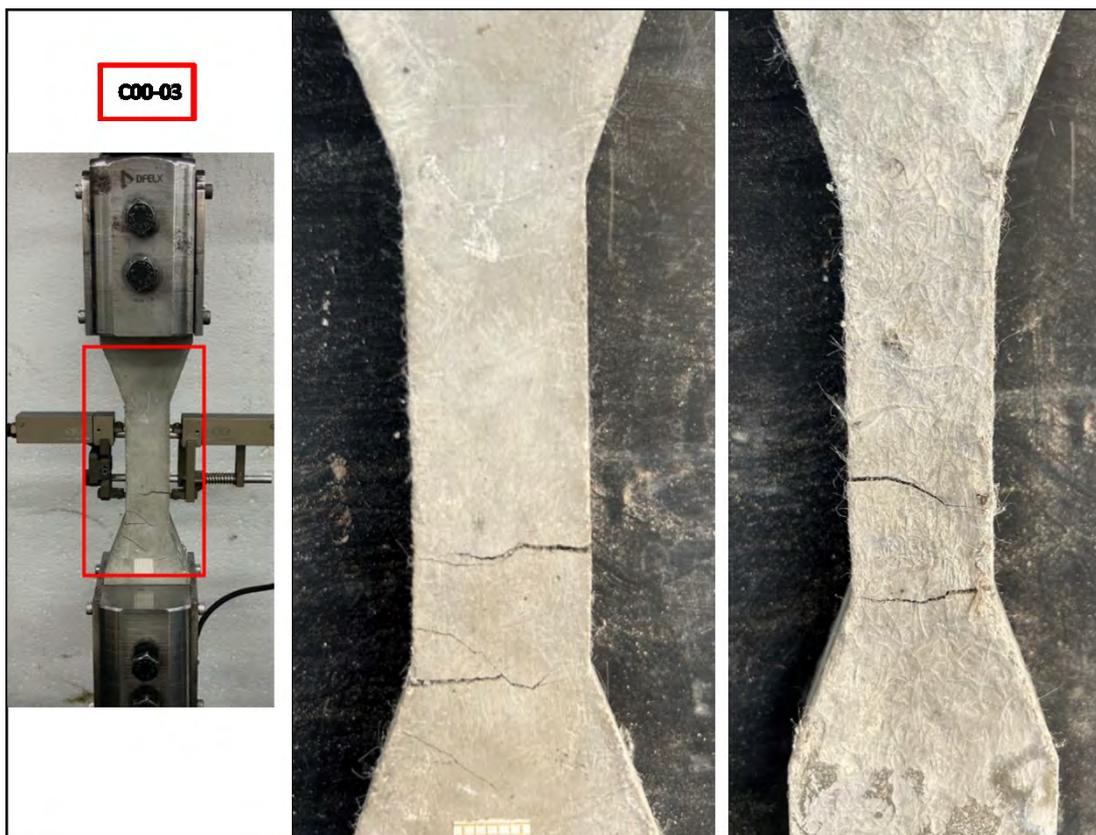


Figura 127 – Registro fotográfico – Ensaio de tração direta do corpo de prova C00-03
(Fonte: A autora, 2024).

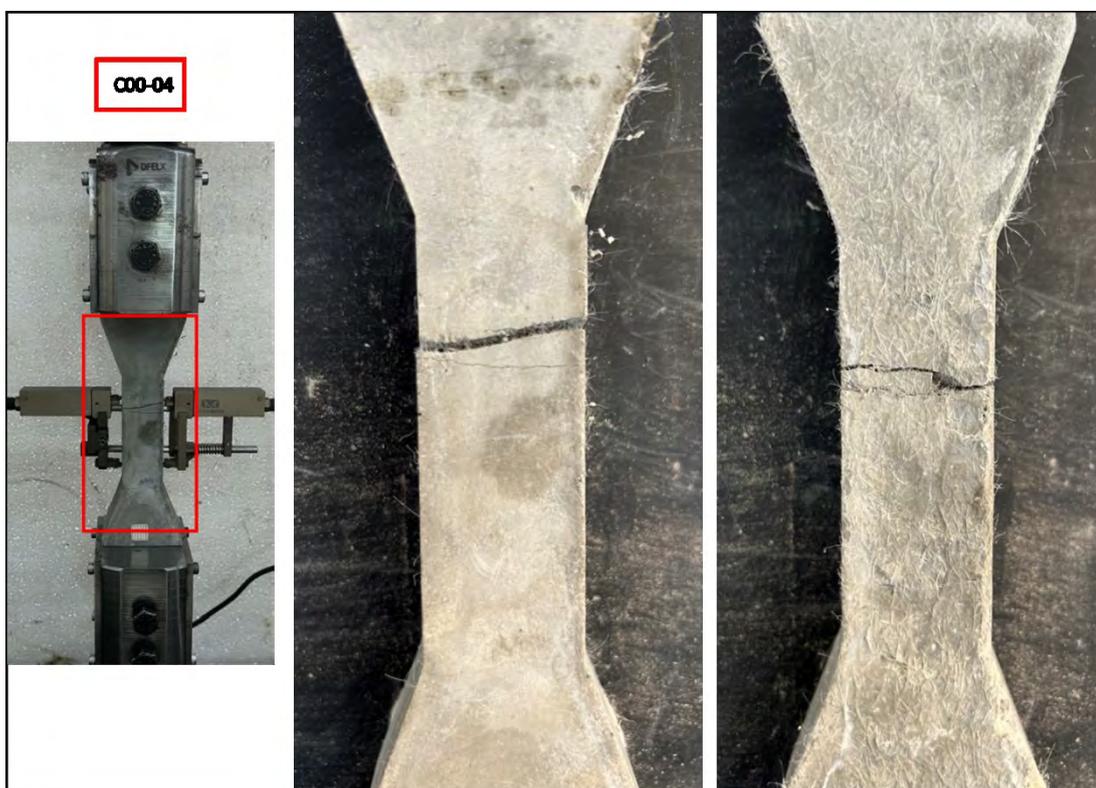


Figura 128 – Registro fotográfico – Ensaio de tração direta do corpo de prova C00-04
(Fonte: A autora, 2024).

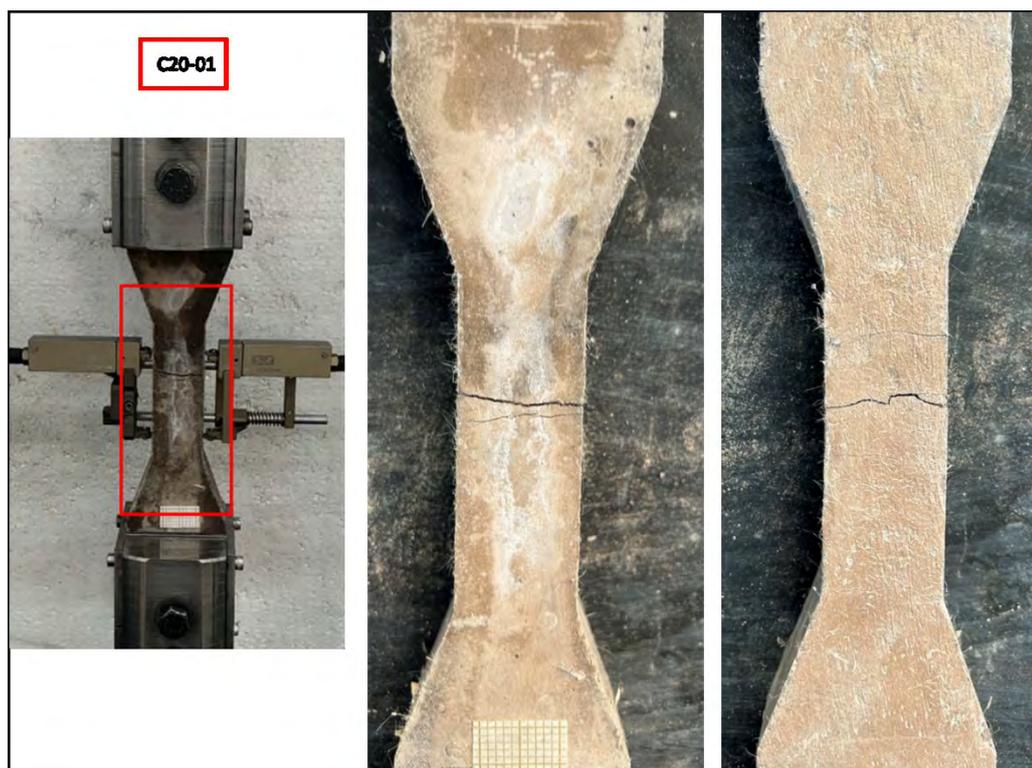


Figura 129 – Registro fotográfico – Ensaio de tração direta do corpo de prova C20-01
(Fonte: A autora, 2024).

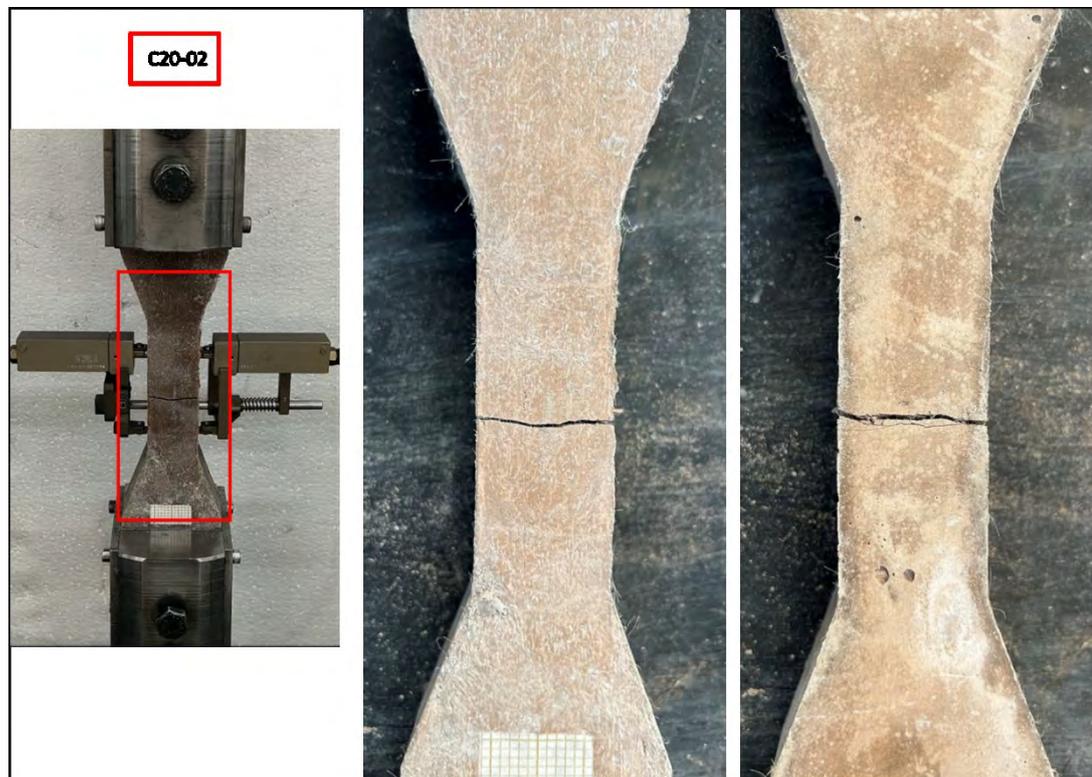


Figura 130 – Registro fotográfico – Ensaio de tração direta do corpo de prova C20-02
(Fonte: A autora, 2024).

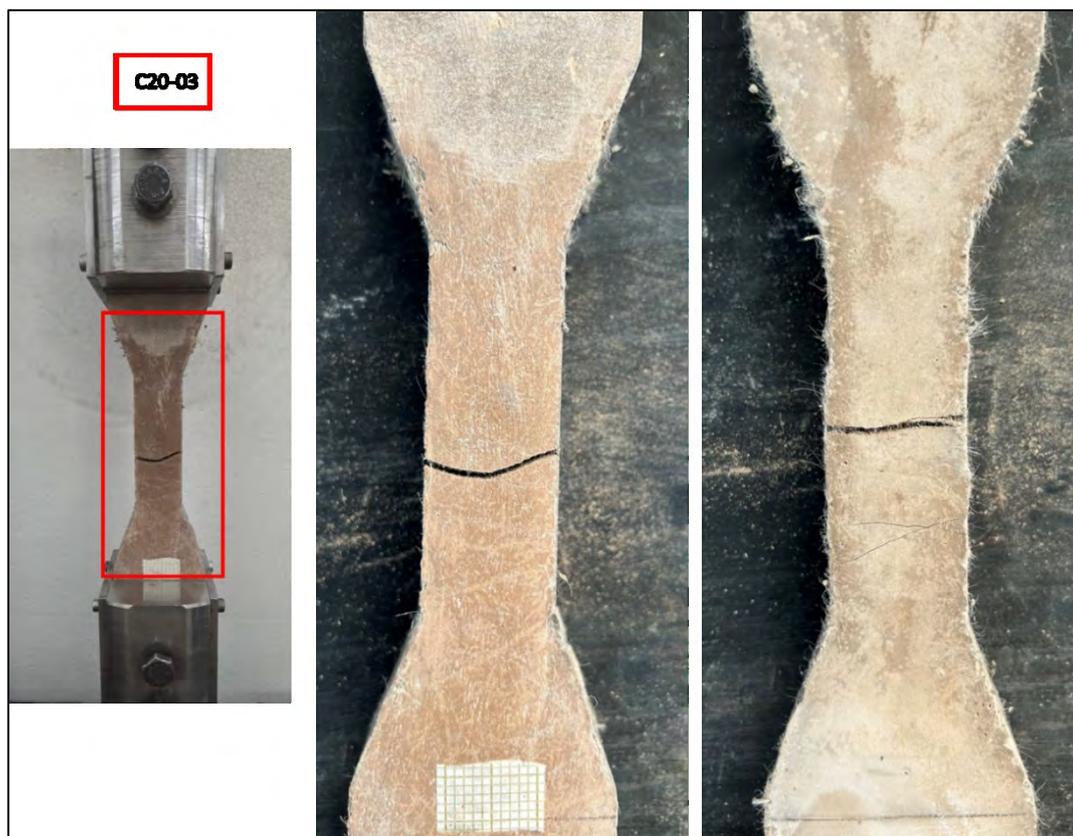


Figura 131 – Registro fotográfico – Ensaio de tração direta do corpo de prova C20-03
(Fonte: A autora, 2024).

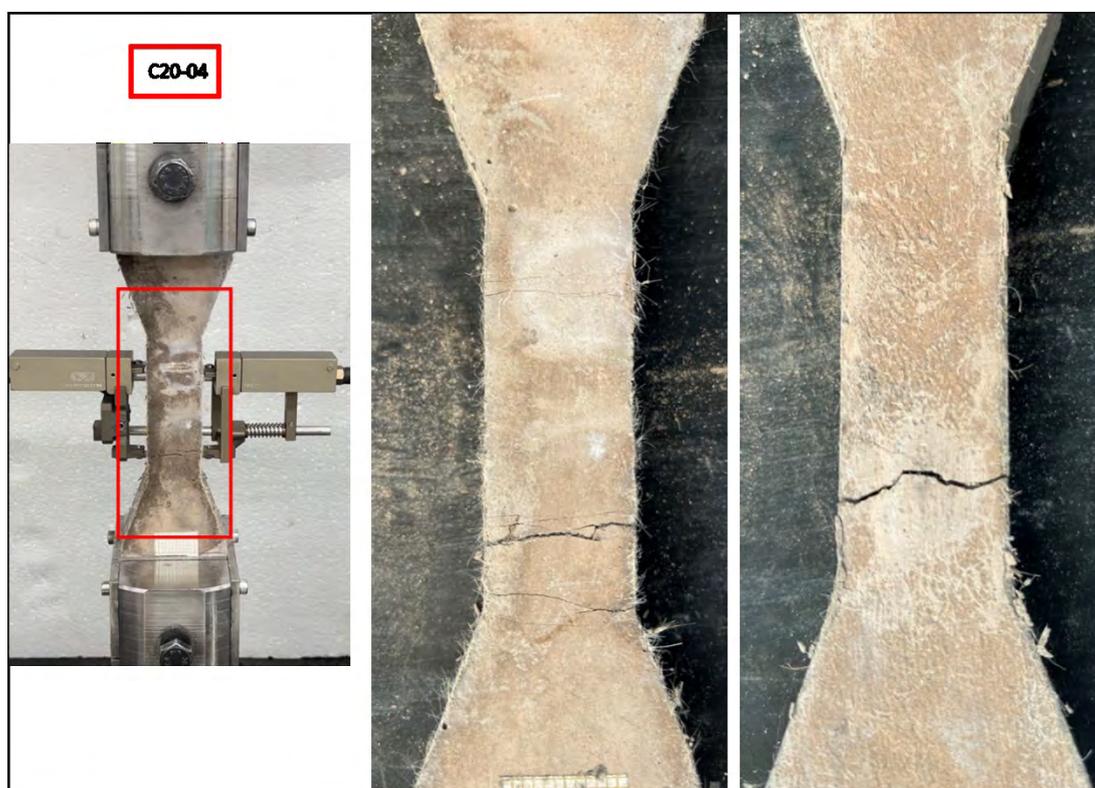


Figura 132 – Registro fotográfico – Ensaio de tração direta do corpo de prova C20-04
(Fonte: A autora, 2024).

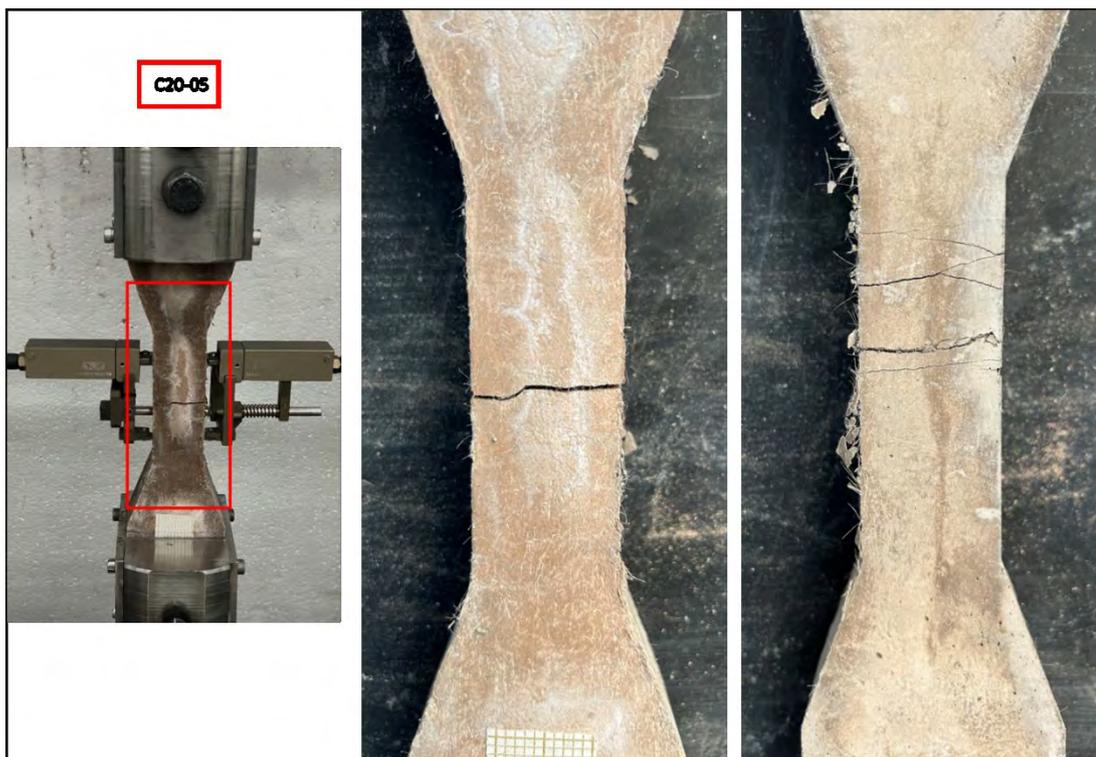


Figura 133 – Registro fotográfico – Ensaio de tração direta do corpo de prova C20-05
(Fonte: A autora, 2024).

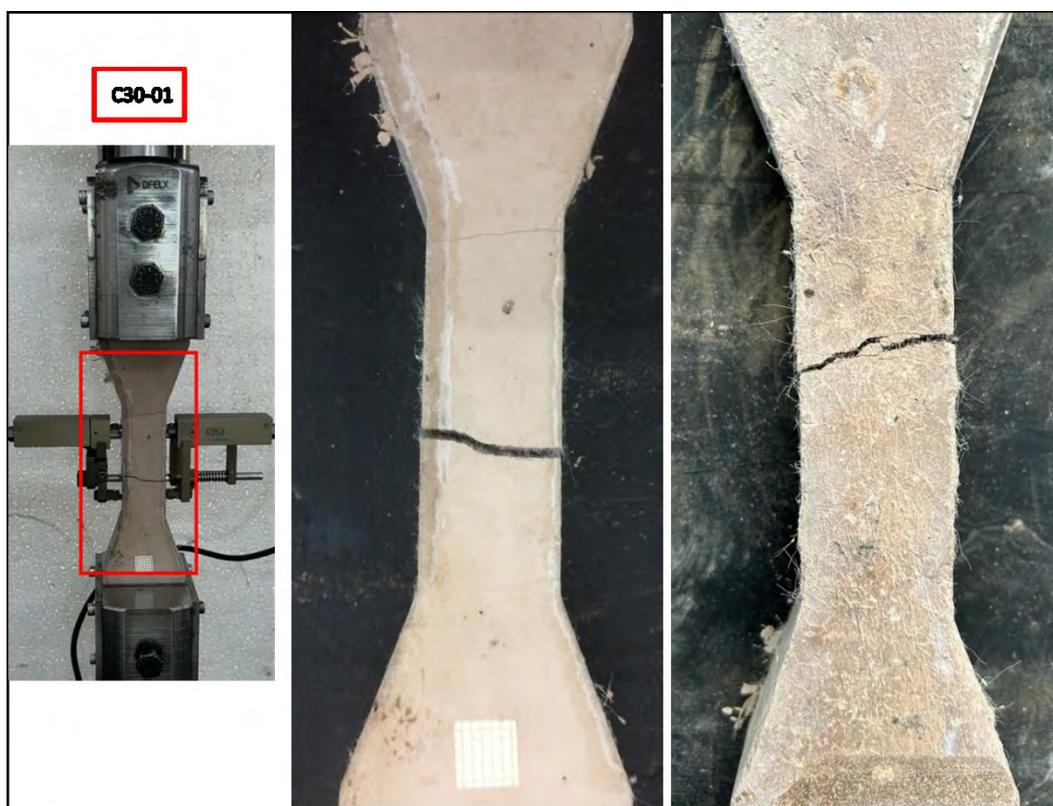


Figura 134 – Registro fotográfico – Ensaio de tração direta do corpo de prova C30-01
(Fonte: A autora, 2024).

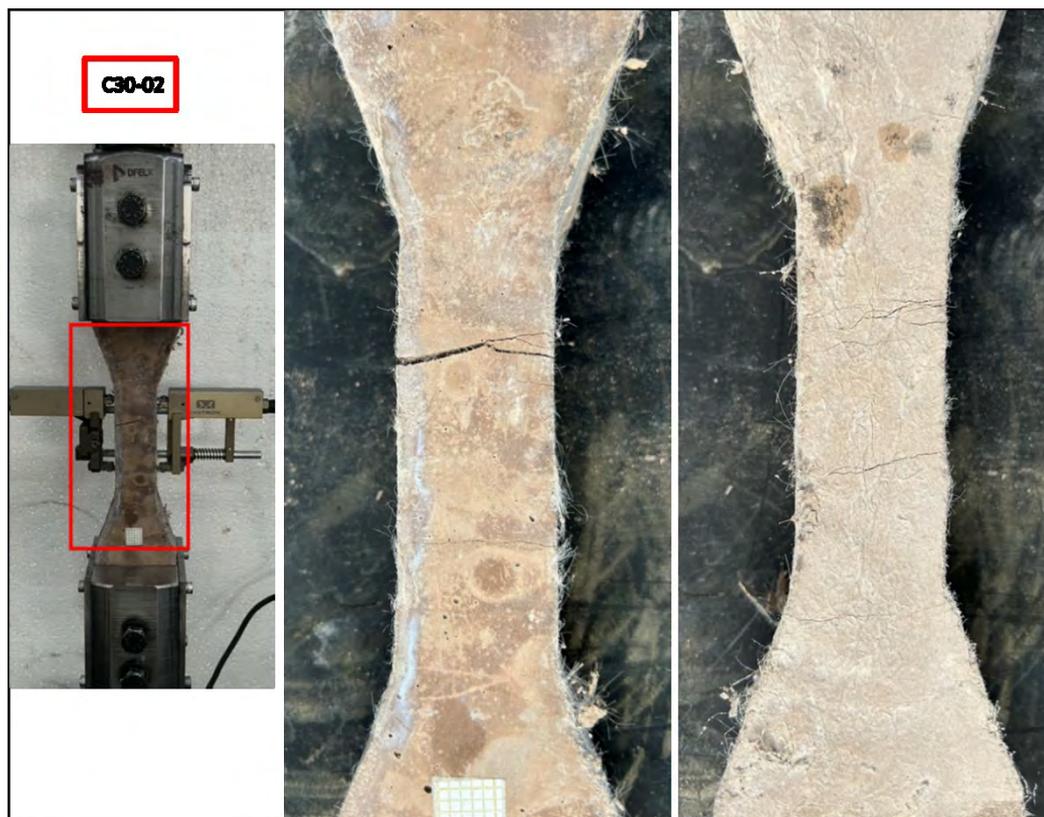


Figura 135 – Registro fotográfico – Ensaio de tração direta do corpo de prova C30-02
(Fonte: A autora, 2024).

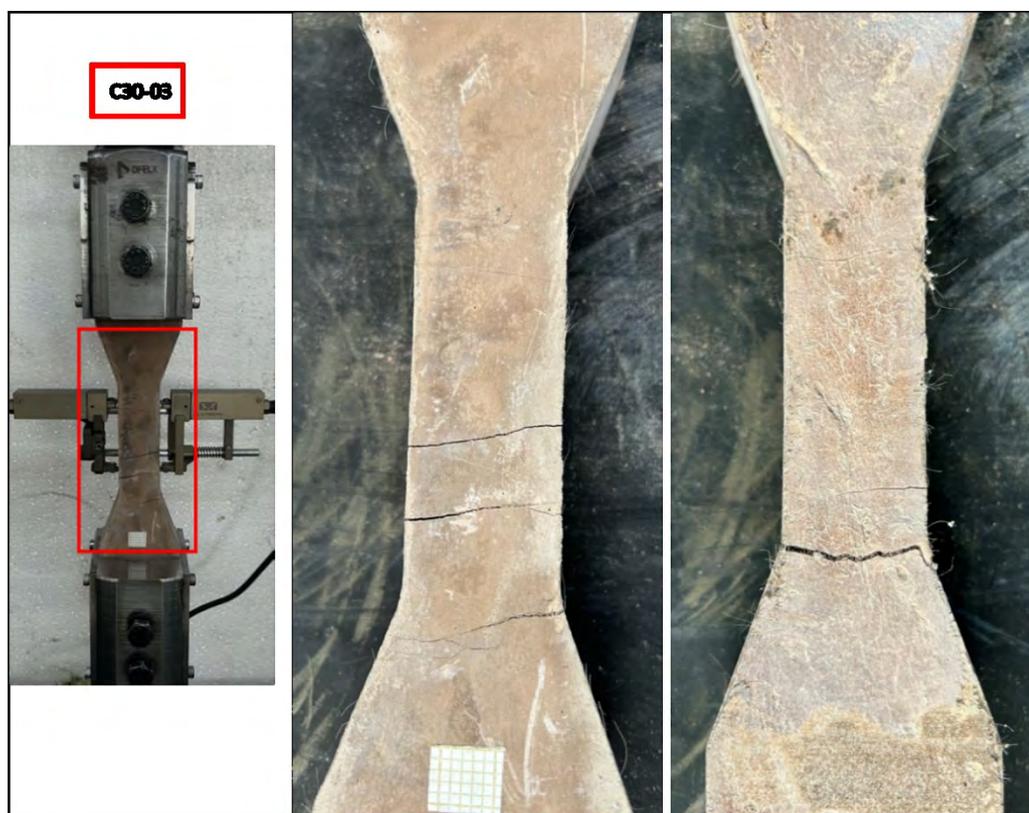


Figura 136 – Registro fotográfico – Ensaio de tração direta do corpo de prova C30-03
(Fonte: A autora, 2024).

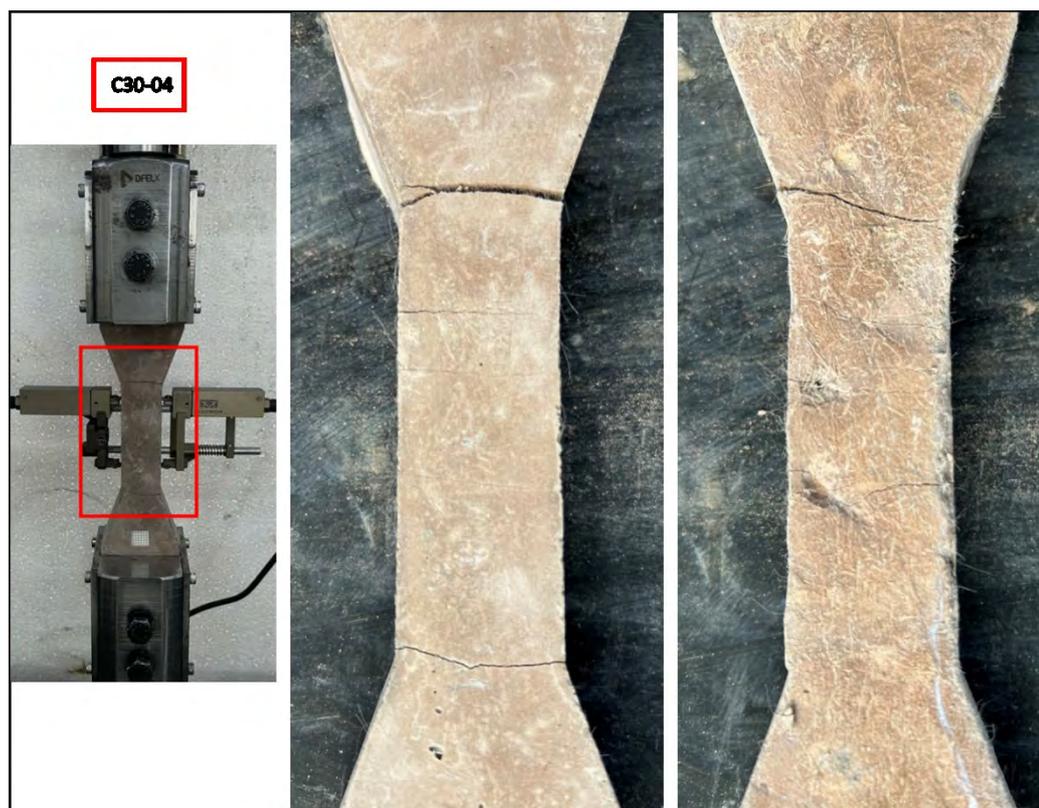


Figura 137 – Registro fotográfico – Ensaio de tração direta do corpo de prova C30-04
(Fonte: A autora, 2024).

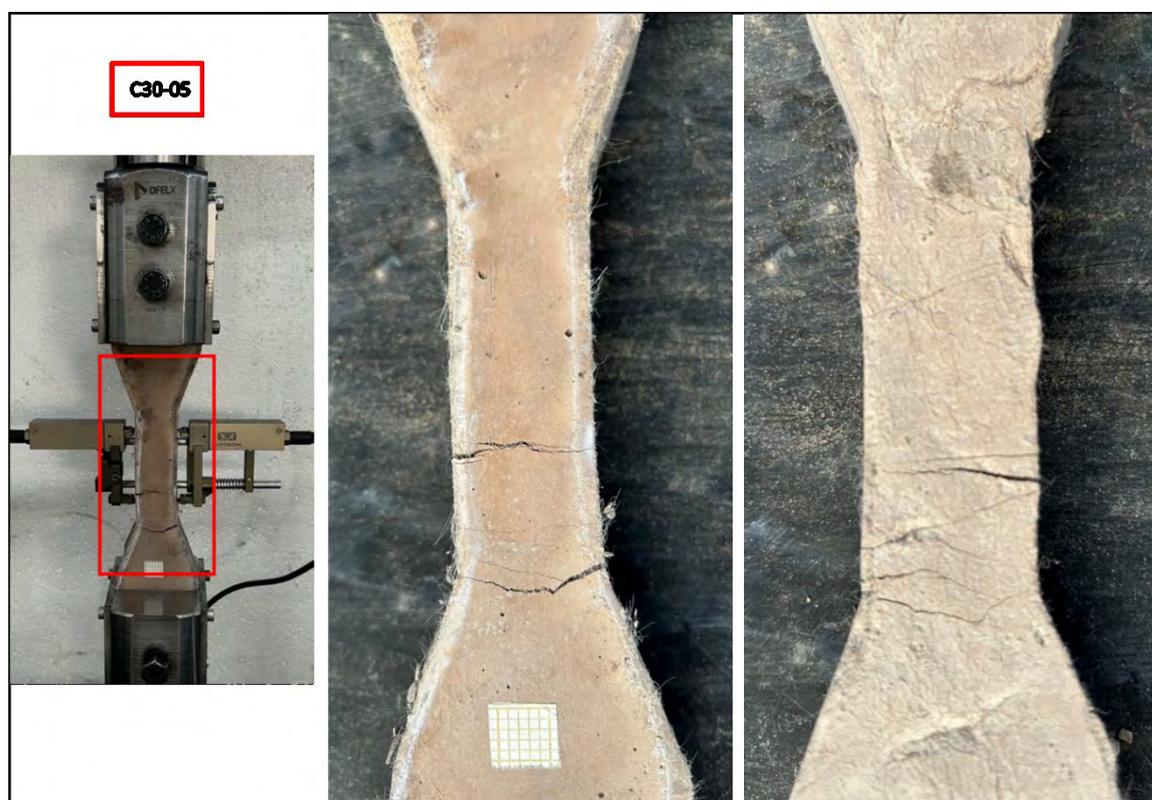


Figura 138 – Registro fotográfico – Ensaio de tração direta do corpo de prova C30-05
(Fonte: A autora, 2024).

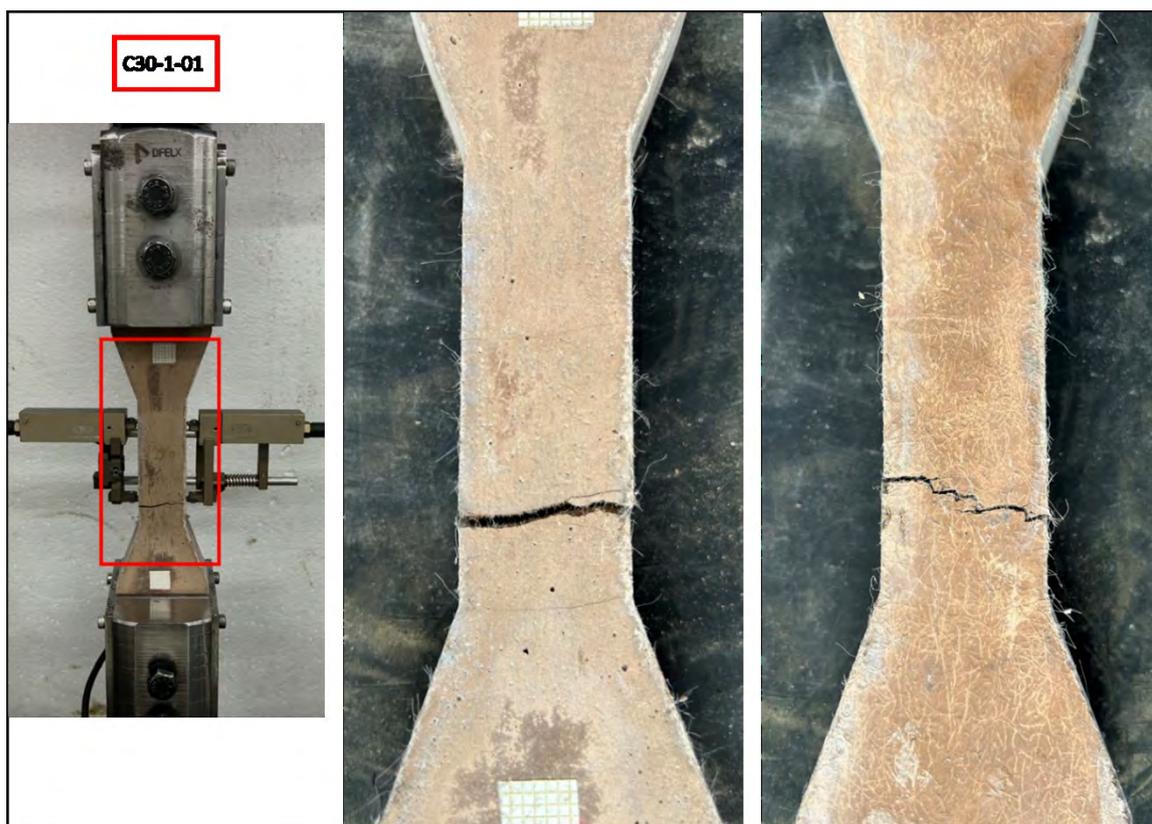


Figura 139 – Registro fotográfico – Ensaio de tração direta do corpo de prova C30-1-01
(Fonte: A autora, 2024).

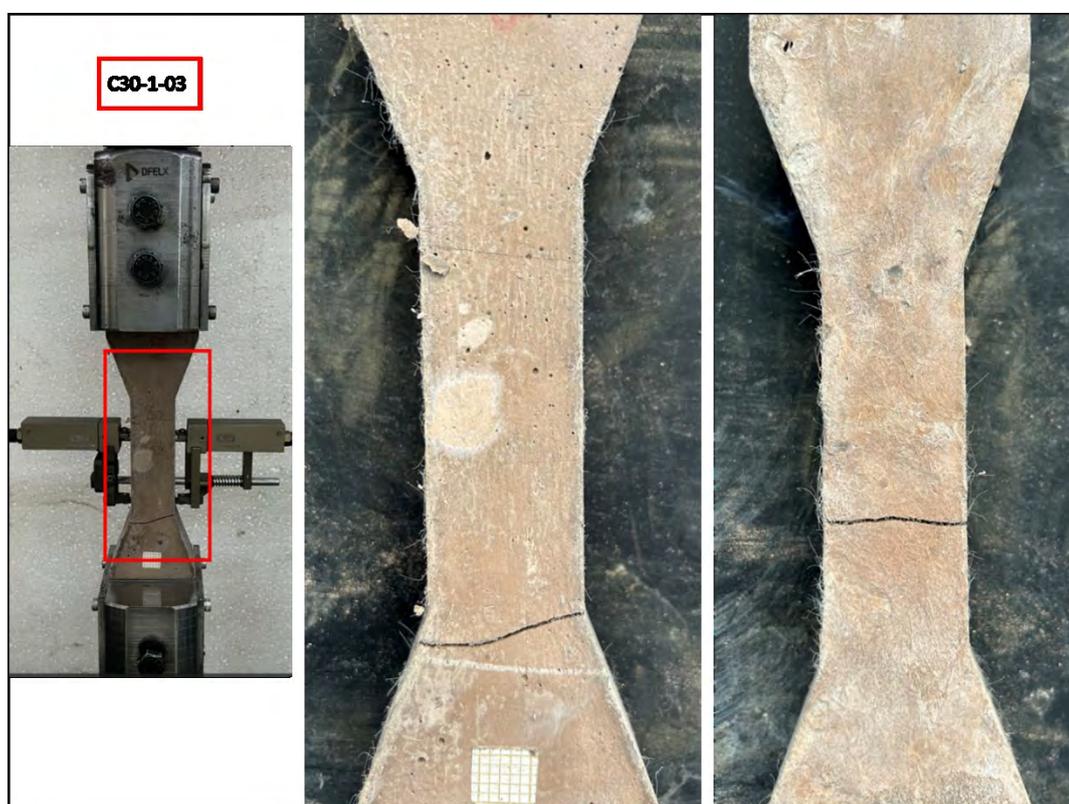


Figura 140 – Registro fotográfico – Ensaio de tração direta do corpo de prova C30-1-03
(Fonte: A autora, 2024).



Figura 141 – Registro fotográfico – Ensaio de tração direta do corpo de prova C30-1-04
(Fonte: A autora, 2024).

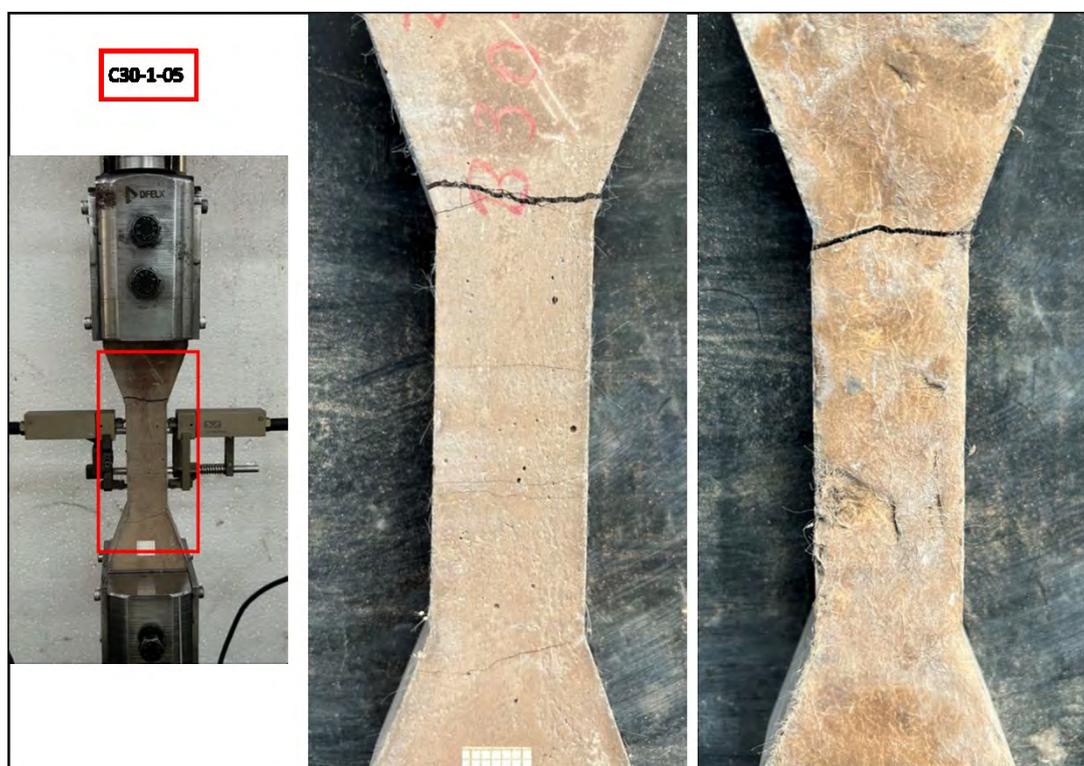


Figura 142 – Registro fotográfico – Ensaio de tração direta do corpo de prova C30-1-05
(Fonte: A autora, 2024).

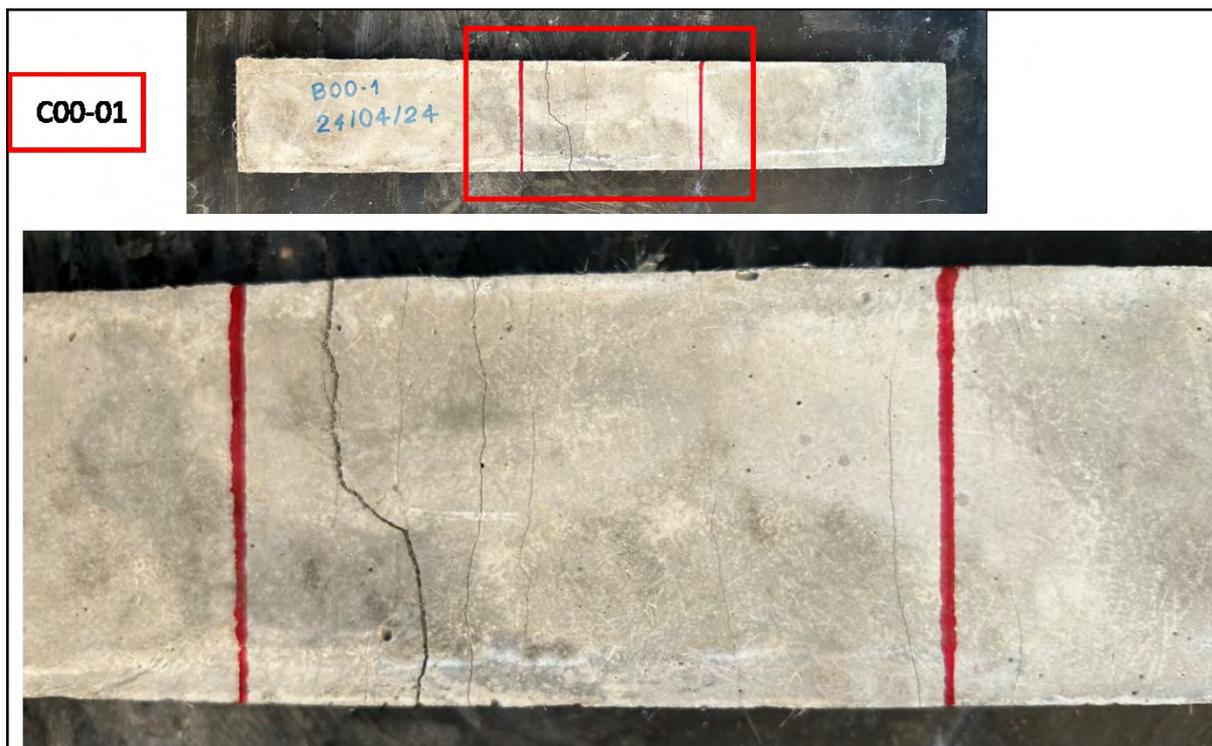


Figura 143 – Registro fotográfico – Ensaio de flexão do corpo de prova C00-01 (Fonte: A autora, 2024).



Figura 144 – Registro fotográfico – Ensaio de flexão do corpo de prova C00-02 (Fonte: A autora, 2024).



Figura 145 – Registro fotográfico – Ensaio de flexão do corpo de prova C00-03 (Fonte: A autora, 2024).



Figura 146 – Registro fotográfico – Ensaio de flexão do corpo de prova C00-04 (Fonte: A autora, 2024).



Figura 147 – Registro fotográfico – Ensaio de flexão do corpo de prova C00-05 (Fonte: A autora, 2024).

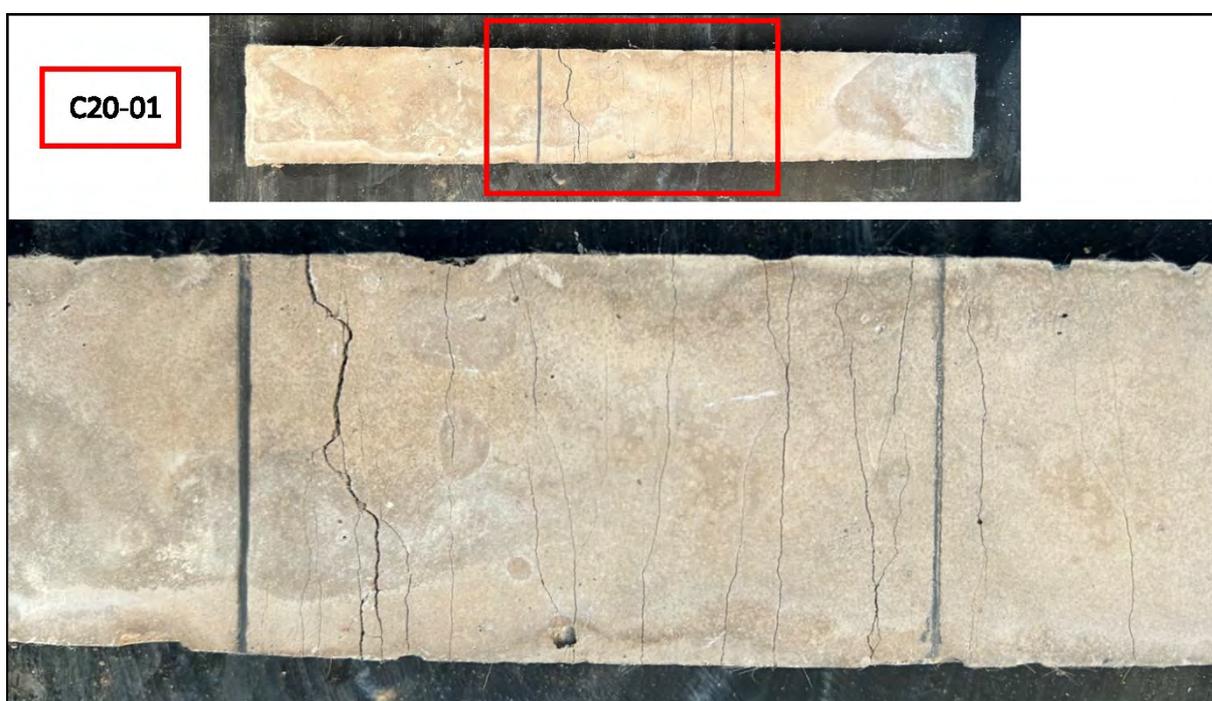


Figura 148 – Registro fotográfico – Ensaio de flexão do corpo de prova C20-01 (Fonte: A autora, 2024).

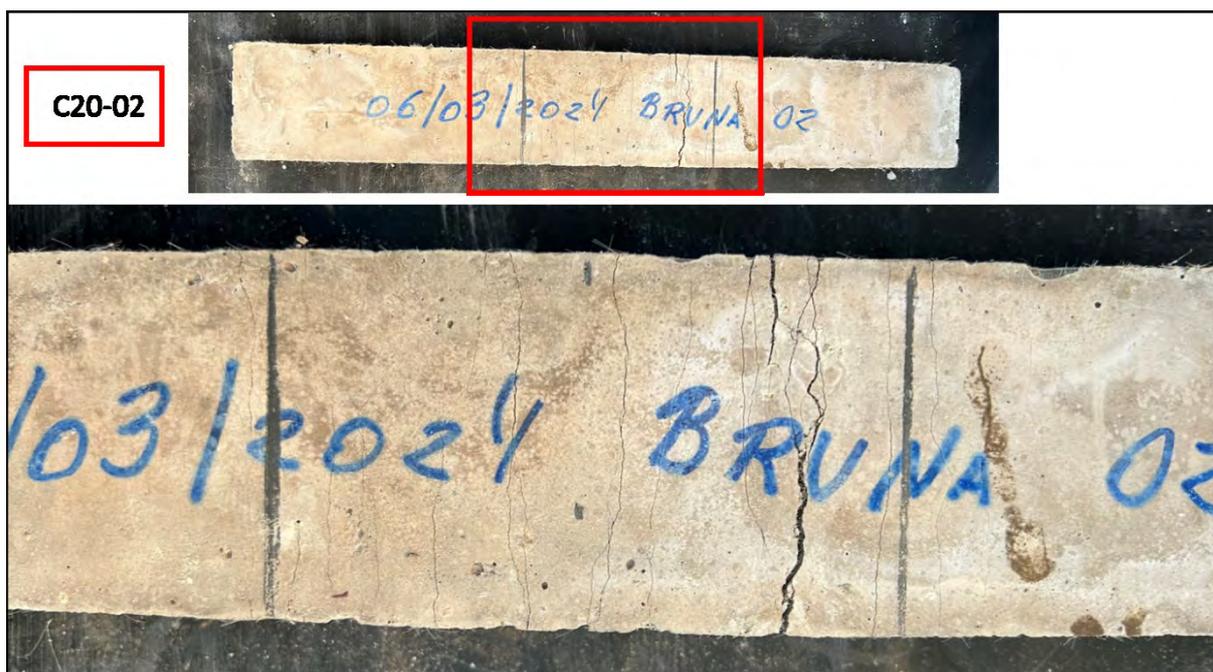


Figura 149 – Registro fotográfico – Ensaio de flexão do corpo de prova C20-02 (Fonte: A autora, 2024).

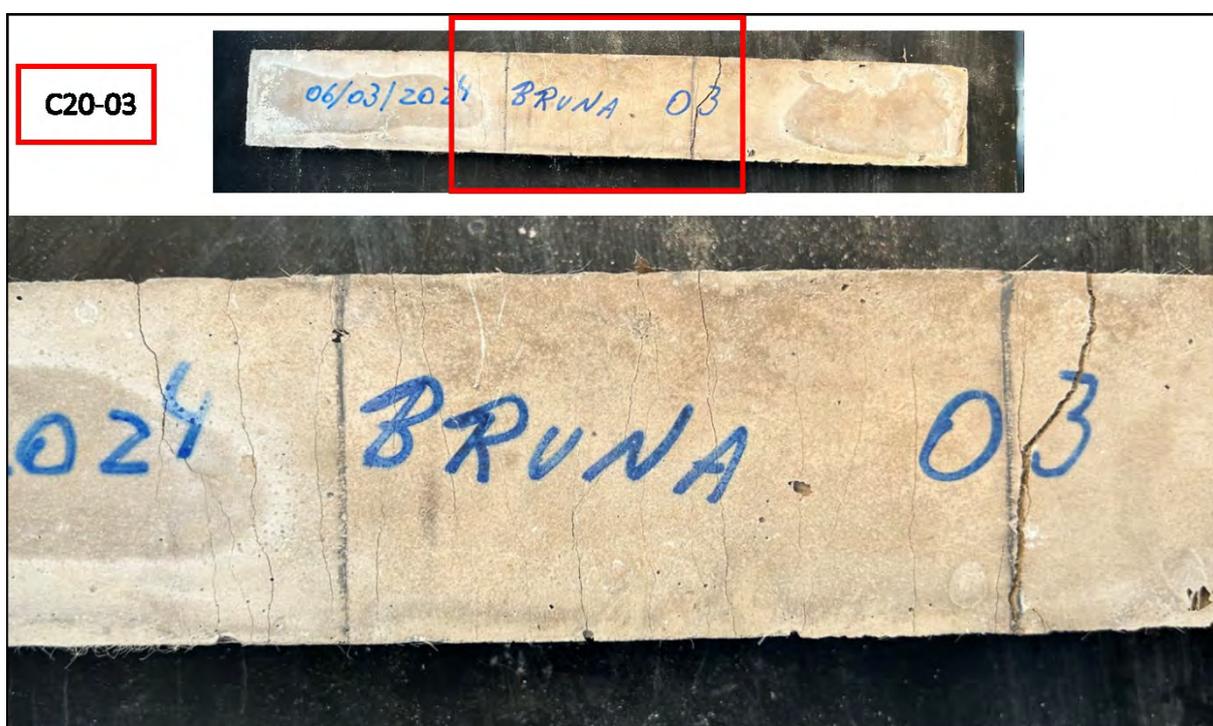


Figura 150 – Registro fotográfico – Ensaio de flexão do corpo de prova C20-03 (Fonte: A autora, 2024).

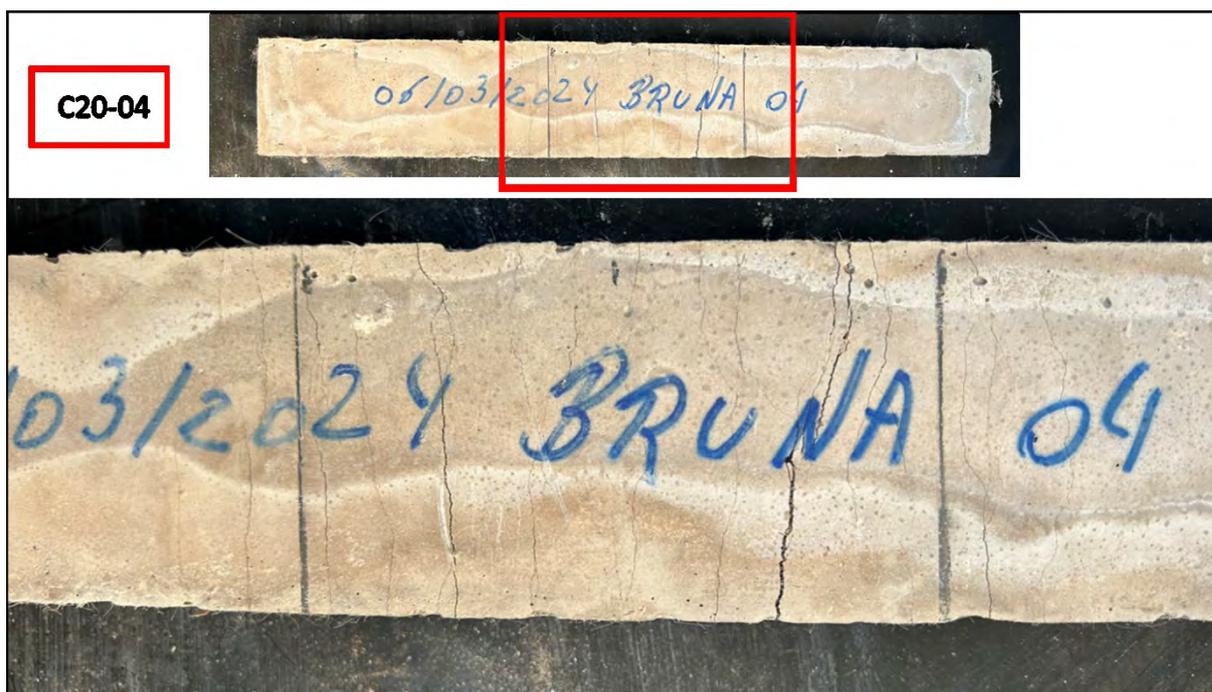


Figura 151 – Registro fotográfico – Ensaio de flexão do corpo de prova C20-04 (Fonte: A autora, 2024).

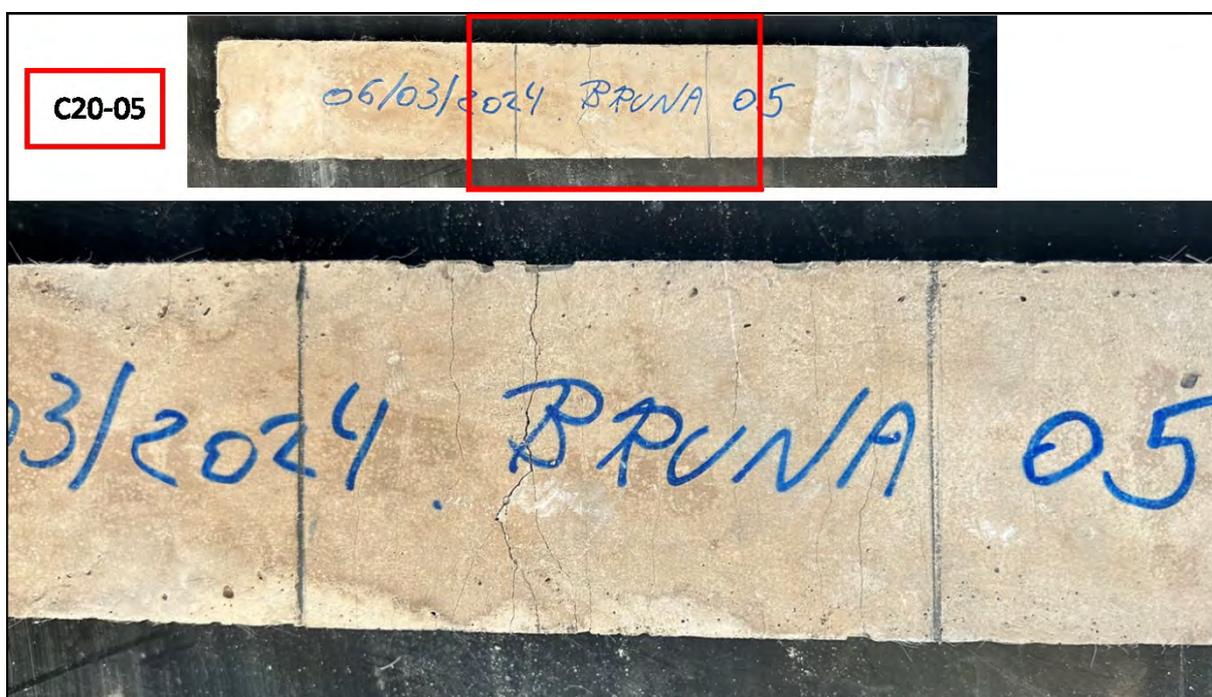


Figura 152 – Registro fotográfico – Ensaio de flexão do corpo de prova C20-05 (Fonte: A autora, 2024).

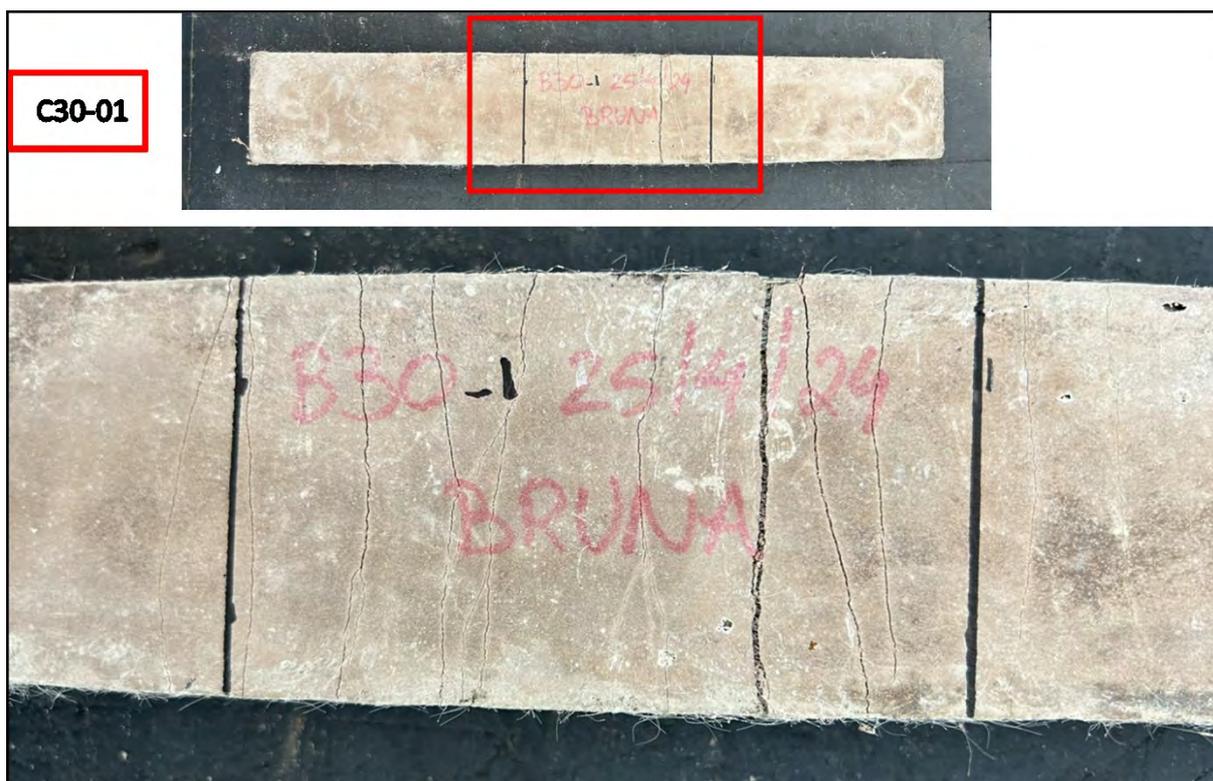


Figura 153 – Registro fotográfico – Ensaio de flexão do corpo de prova C30-01 (Fonte: A autora, 2024).

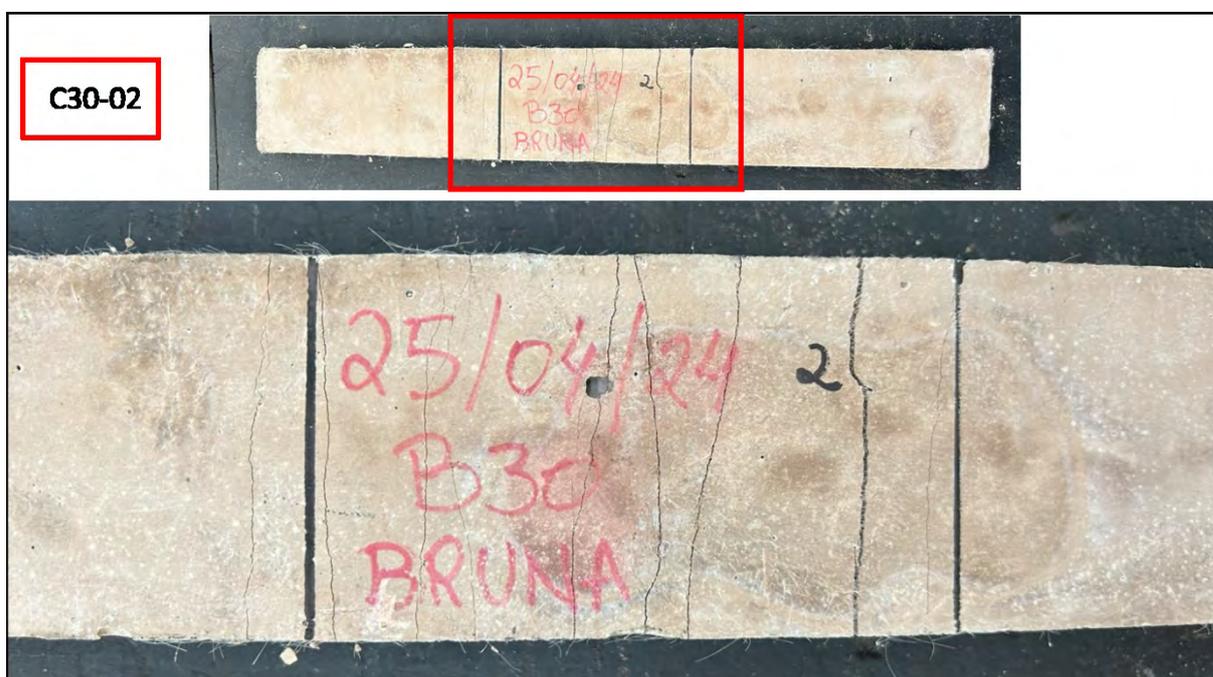


Figura 154 – Registro fotográfico – Ensaio de flexão do corpo de prova C30-02 (Fonte: A autora, 2024).

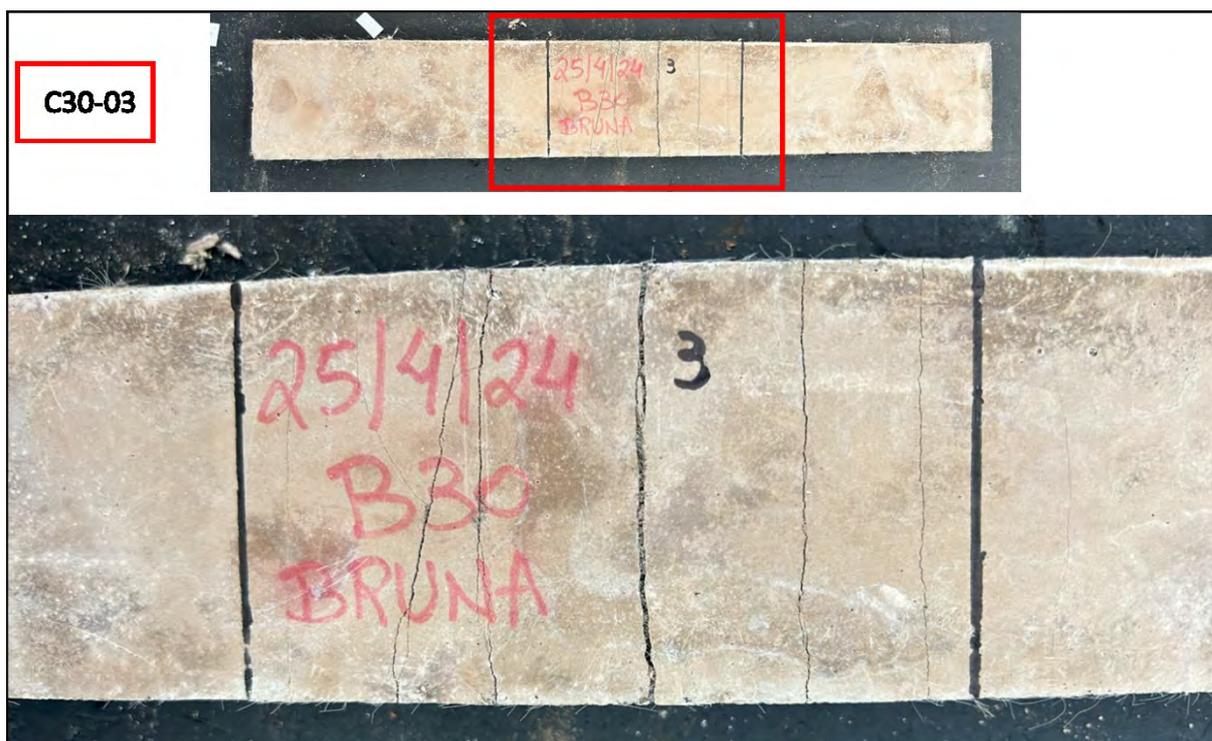


Figura 155 – Registro fotográfico – Ensaio de flexão do corpo de prova C30-03 (Fonte: A autora, 2024).

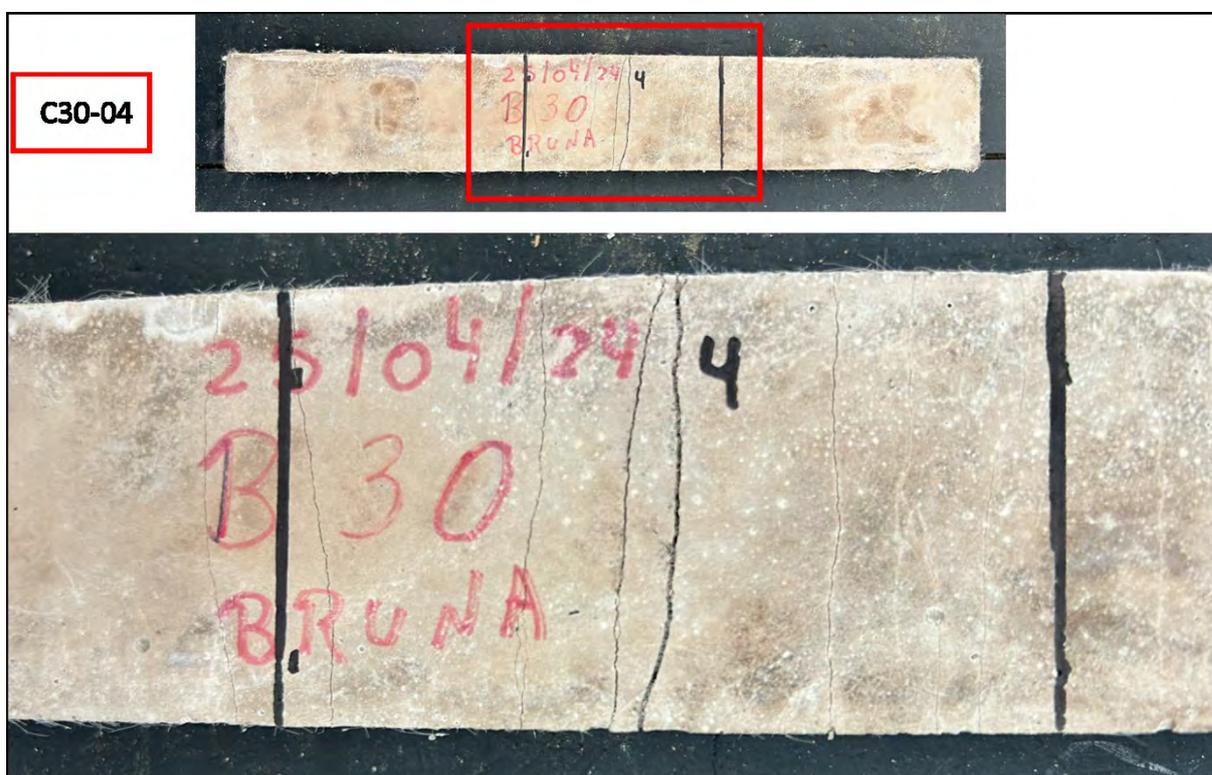


Figura 156 – Registro fotográfico – Ensaio de flexão do corpo de prova C30-04 (Fonte: A autora, 2024).



Figura 157 – Registro fotográfico – Ensaio de flexão do corpo de prova C30-05 (Fonte: A autora, 2024).



Figura 158 – Registro fotográfico – Ensaio de flexão do corpo de prova C30-1-01 (Fonte: A autora, 2024).



Figura 159 – Registro fotográfico – Ensaio de flexão do corpo de prova C30-1-02 (Fonte: A autora, 2024).



Figura 160 – Registro fotográfico – Ensaio de flexão do corpo de prova C30-1-03 (Fonte: A autora, 2024).



Figura 161 – Registro fotográfico – Ensaio de flexão do corpo de prova C30-1-04 (Fonte: A autora, 2024).



Figura 162 – Registro fotográfico – Ensaio de flexão do corpo de prova C30-1-05 (Fonte: A autora, 2024).