



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

Vivianne Machado da Costa

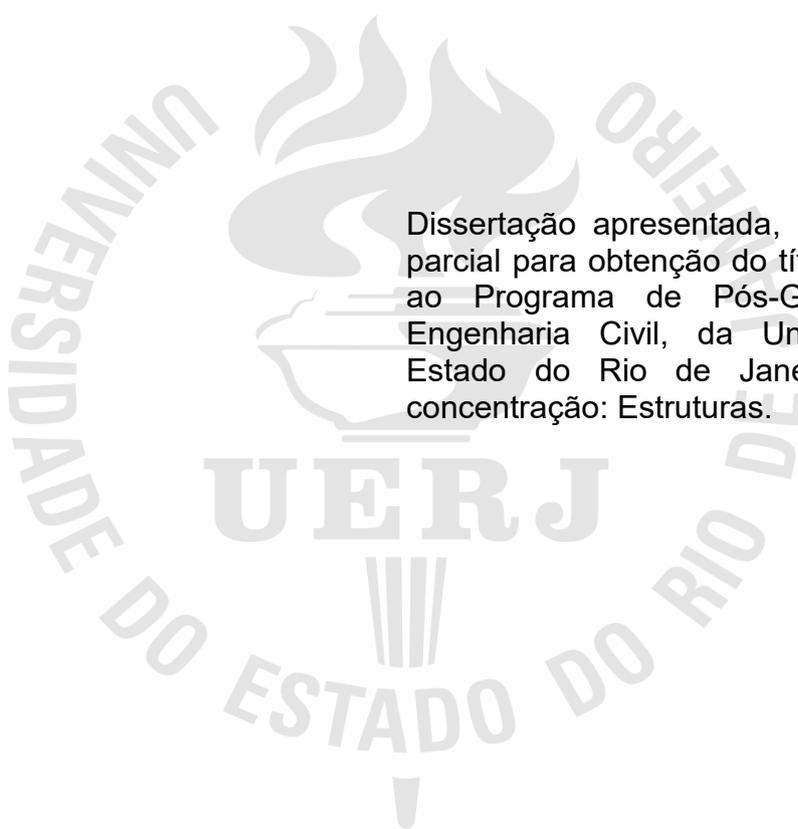
**Resíduo de britagem em substituição da areia natural em
compósitos cimentícios do tipo SHCC e sua aplicação como
encamisamento de concretos**

Rio de Janeiro

2024

Vivianne Machado da Costa

Resíduo de britagem em substituição da areia natural em compósitos do tipo SHCC e sua aplicação como encamisamento de concretos



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.

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Margareth da Silva Magalhães

Rio de Janeiro

2024

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

C837 Costa, Vivianne Machado da.
Resíduos de britagem em substituição da areia natural em compósitos cimentícios do tipo SHCC e sua aplicação como encamisamento de concretos / Vivianne Machado da Costa. – 2024.
159 f.

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

1. Engenharia civil - Teses. 2. Agregados (Materiais de construção) - Teses. 3. Cimento - Teses. 4. Construção de concreto - Teses. I. Magalhães, Margareth da Silva. II. Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Faculdade de Engenharia. III. Título.

CDU 691.322

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

05 de agosto de 2024

Data

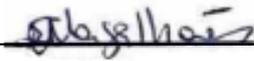
Vivianne Machado da Costa

Resíduo de britagem em substituição da areia natural em compósitos do tipo SHCC e sua aplicação como encamisamento de concretos

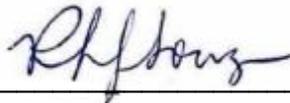
Dissertação apresentada, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre, ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de concentração: Estruturas.

Aprovado em: 28 de fevereiro de 2024.

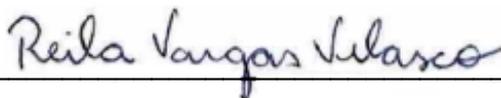
Banca Examinadora:



Prof^a. Dr^a. Margareth da Silva Magalhães (Orientadora)
Faculdade de Engenharia – UERJ



Prof^a. Dr^a. Regina Helena Ferreira de Souza
Faculdade de Engenharia – UERJ



Prof^a. Dr^a. Reila Vargas Velasco
Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ

Rio de Janeiro

2024

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho à memória do meu pai, Afranio Colares Ribeiro da Costa, que sempre foi grande incentivador dos meus estudos e um entusiasta da profissão que escolhi. Onde quer que ele esteja, sempre estará comigo.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais Afranio Colares e Vannira Machado, pela orientação, dedicação e amor incondicional. Aos meus irmãos, por sempre me apoiarem e vibrarem com cada pequena conquista. A minha avó Jacyra Machado, minha fonte de inspiração.

Ao meu marido Guilherme Seguin, que sempre esteve ao meu lado não só nos momentos felizes, mas também nos momentos de angústias e dificuldades, me dando apoio, carinho e forças para prosseguir, não me deixando desistir jamais.

A minha orientadora, Prof^a. Dr^a. Margareth da Silva Magalhães, por toda a ajuda e demonstração de força de vontade, pelo apoio em momentos muito difíceis da minha vida e pela excelente orientação, apontando os melhores caminhos, dando estímulos para o desenvolvimento deste trabalho.

Aos meus amigos do eixo Belém - Rio de Janeiro, vocês tornaram meus dias mais leves.

Aos meus amigos de mestrado Max Lyra, Daniel Costa e Rhuan Cardoso, pelo companheirismo e pelo inegável apoio quando necessário. Vocês foram fundamentais nessa conquista.

Aos amigos do laboratório de engenharia civil da UERJ, André Luiz Turco, Danilo Veras, Beatriz Bravin, Flávio Costa e Ingrid Pereira, pelo apoio e paciência no dia a dia de trabalho no laboratório.

A UERJ, porque sem ela não poderia ter realizado este sonho de conquista.

A todos aqueles, que embora não citados nominalmente, contribuíram direta e indiretamente para a execução deste trabalho.

A Lafarge Holcim pela doação do cimento e a empresa Ibrata Mineração pela doação da areia de britagem utilizada neste estudo.

Bom mesmo é ir à luta com determinação, abraçar a vida com paixão, perder com classe e vencer com ousadia, porque o mundo pertence a quem se atreve e a vida é “muito” para ser insignificante.

Charles Chaplin

RESUMO

COSTA, Vivianne Machado da. *Resíduo de britagem em substituição da areia natural em compósitos do tipo SHCC e sua aplicação como encamisamento de concretos*. 2024. 159 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2024.

A indústria da construção é reconhecida como um setor com grande contribuição para o desenvolvimento econômico e social de um país. No entanto, com o seu desenvolvimento, também aumenta o consumo de recursos naturais e, conseqüentemente, a geração de resíduos. Apesar de a sociedade, e em particular a indústria da construção, reconhecer a importância dos recursos naturais, autoriza-se sua exploração em grandes quantidades, mesmo em meio ao crescimento global da sustentabilidade ambiental. Os agregados utilizados nesta indústria são os insumos minerais mais consumidos mundialmente. Assim, o presente trabalho investigou o comportamento físico e mecânico de compósitos cimentícios do tipo SHCC (*strain hardening cementitious composites*), que é uma classe de compósito de alta ductilidade, substituindo a areia natural por areia de britagem, visando avaliar sua viabilidade como reforço em estruturas de concreto. Foram analisadas quatro granulometrias diferentes da areia de britagem, buscando o seu melhor aproveitamento, e levando em consideração que o tamanho da areia exerce importante influência nas propriedades do SHCC. Além disso, foi utilizada cinza volante com duas finuras distintas nas misturas do SHCC e sua matriz. Os resultados indicaram que o aumento da granulometria da areia de britagem e o uso de cinza volante beneficiada resultaram em maior tenacidade à fratura da matriz. Não foi observado um aumento significativo na resistência à compressão do compósito com o aumento do tamanho do grão de areia, com ambos os tipos de cinza volante. No entanto, as misturas com areia de britagem apresentaram maior resistência à compressão em comparação com a areia natural. O SHCC com cinza volante beneficiada teve, em média, valores de resistência à compressão axial 60% maiores do que com cinza volante residual. Todas as misturas apresentaram um comportamento de *strain hardening*, mas conforme aumentou o grão de areia, a capacidade de deformação à tração diminuiu. O reforço de SHCC demonstrou resultados satisfatórios de resistência, evidenciando a relevância das substituições propostas. Esses resultados contribuem para o desenvolvimento de técnicas de reforço estrutural mais sustentáveis na indústria da construção civil.

Palavras-chave: SHCC; Areia artificial; Resíduo de britagem; Areia de britagem; Cinza volante; Reforço estrutural.

ABSTRACT

COSTA, Vivianne Machado da. *Crushed sand replacing natural sand in SHCC composites and its application as concrete jacketing*. 2024. 159 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2024.

The construction industry is recognized as a sector with significant contributions to the economic and social development of a country. However, with its development, there is also an increase in the consumption of natural resources and, consequently, the generation of waste. Despite society, and particularly the construction industry, acknowledging the importance of natural resources, their exploitation in large quantities is still authorized, even amidst the global growth of environmental sustainability. Aggregates used in this industry are the most consumed mineral inputs worldwide. Therefore, this study investigated the physical and mechanical behavior of strain hardening cementitious composites (SHCC) replacing natural sand with crushed sand, aiming to evaluate its feasibility as reinforcement in concrete structures. Four different granulometries of crushed sand were analyzed, seeking optimal utilization, considering that the sand size significantly influences SHCC properties. Additionally, fly ash with two distinct fineness levels was used in the SHCC mixtures and its matrix. Results demonstrated that augmenting the granulometry of crushed sand and using beneficiated fly ash resulted in greater fracture toughness of the matrix. There was no significant increase in the compressive strength of the composite with the increase in sand grain size, with both types of fly ash. However, mixtures with crushed sand showed higher compressive strength compared to natural sand. SHCC with beneficiated fly ash had, on average, 60% higher axial compressive strength than residual fly ash. All mixtures exhibited strain hardening behavior, but as the sand grain size increased, the tensile deformation capacity decreased. The reinforcement of SHCC showed satisfactory strength results, highlighting the relevance of the proposed substitutions. These findings contribute to the development of more sustainable structural reinforcement techniques in the construction industry.

Keywords: SHCC; Artificial sand; Crushing waste; Crushing sand; Fly ash; Structural reinforcement.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1 – Ciclo de formação das rochas (LOPES E CARNEIRO, 2009). | 21 |
| Figura 2 – Esquema de formação de rochas ígneas ou magmáticas (Adaptado de PRESS <i>et al.</i> , p. 106, 2006). | 22 |
| Figura 3 – Rocha de granito (a) e basalto (b) (BOUROTTE, p. 199, 2017)..... | 23 |
| Figura 4 – Esquema de formação de rochas sedimentares (COSTA <i>et al.</i> , 2014).... | 24 |
| Figura 5 – (a) Arenito e (b) gesso (OLIVEIRA <i>et al.</i> , 2013). | 24 |
| Figura 6 – Esquema de formação de rochas metamórficas (SALSA <i>et al.</i> , 2017).... | 25 |
| Figura 7 – (a) Gnaisse e (b) mármore (SALSA <i>et al.</i> , 2017). | 26 |
| Figura 8 – Gnaisse Granítico (USP, 2023). | 27 |
| Figura 9 – Demanda histórica do consumo de agregados no Brasil (ANEPAC, 2022). | 29 |
| Figura 10 – Demanda por agregados (ANEPAC, 2022). | 31 |
| Figura 11 – Pátio a céu aberto da pedreira Ibrata, com área de lavra ao fundo - RJ. | 32 |
| Figura 12 – Fluxograma do processo produtivo de uma pedreira (Adaptado de LAPA, 2006). | 33 |
| Figura 13 – Processo de britagem (Empresa Ibrata). | 33 |
| Figura 14 – Carregamento do produto final para venda com o auxílio de pá carregadeira (Empresa Ibrata). | 34 |
| Figura 15 – Esquema de formação de um material compósito (SCHWARTZ, 1984). | 38 |
| Figura 16 – Curva tensão-deformação à tração e abertura de fissuras características de um SHCC e de um concreto convencional (SAHMARAN E LI, 2009). | 40 |
| Figura 17 – Muro de Contenção localizado na região de Gifu no Japão, (a) antes da aplicação do reparo e (b) logo após a aplicação do reparo (ROKUGO <i>et al.</i> , 2005). .. | 44 |
| Figura 18 – Fluxograma com as etapas dos estudos nas matrizes e respectivos compósitos (AUTORA, 2023). | 54 |
| Figura 19 – Cinzas volantes (a) beneficiada e (b) residual. | 56 |
| Figura 20 – Mapa da localização das pedreiras na região metropolitana do Rio de Janeiro: nº 14 Empresa Ibrata Mineração Ltda (SILVA, 2005). | 57 |
| Figura 21 – Na ordem da esquerda para a direita: M2.4, M1.2, M0.6, M0.3 e MR.... | 58 |

| | |
|---|-----|
| Figura 22 – Curva granulométrica das areias utilizadas no estudo. | 58 |
| Figura 23 – Fibra de PVA utilizada na composição do SHCC. | 59 |
| Figura 24 – Funil de Marshall. | 61 |
| Figura 25 – Gráfico do tempo de escoamento x teor de superplastificante. | 62 |
| Figura 26 – Argamassadeira utilizada. | 64 |
| Figura 27 – (a) Forma e (b) moldagem do corpo de prova de tenacidade à fratura da matriz. | 65 |
| Figura 28 – (a) Moldagem e (b) desmoldagem de corpos de prova da matriz do compósito. | 65 |
| Figura 29 – (a) Mistura dos ingredientes na argamassadeira e (b) resultado final da mistura de SHCC. | 68 |
| Figura 30 – (a) Formas de flexão, tração e compressão e (b) moldagem de corpo de prova de tração. | 69 |
| Figura 31 – (a) Moldagem, (b) desmoldagem e (c) corpos de prova no tanque com água. | 69 |
| Figura 32 – Mesa com o molde tronco cônico. | 71 |
| Figura 33 – (a) Ensaio de consistência do compósito do tipo SHCC, (b) medindo o espalhamento do SHCC e (c) medindo o espalhamento da matriz. | 71 |
| Figura 34 – Pesagem da mistura fresca no ensaio de massa específica. | 73 |
| Figura 35 – (a) Máquina servo controlada utilizada no estudo e (b) configuração do ensaio de compressão axial. | 74 |
| Figura 36 – Corpos de prova capeados. | 75 |
| Figura 37 – Ensaio de compressão diametral. | 76 |
| Figura 38 – Configuração do ensaio de tenacidade à fratura da matriz do SHCC. ... | 78 |
| Figura 39 – (a) Ensaio de flexão durante carregamento e (b) deflectômetro utilizado. | 80 |
| Figura 40 – Medidas do corpo de prova utilizado no ensaio de tração em mm (sem escala). | 81 |
| Figura 41 – Dispositivo e corpo de prova para ensaio de tração com extensômetro. | 82 |
| Figura 42 – Comportamento das misturas conforme o tamanho do grão e (a) tenacidade à fratura e (b) energia de fratura. | 89 |
| Figura 43 – Comportamento das misturas conforme resistência à compressão axial x tamanho do grão. | 98 |
| Figura 44 – Comportamento das misturas MR (a) CVR e (b) CVB sob flexão. | 100 |

| | |
|---|-----|
| Figura 45 – Comportamento das misturas M0.3 (a) CVR e (b) CVB sob flexão. | 101 |
| Figura 46 – Comportamento das misturas M0.6 (a) CVR e (b) CVB sob flexão. | 101 |
| Figura 47 – Comportamento das misturas M1.2 (a) CVR e (b) CVB sob flexão. | 101 |
| Figura 48 – Comportamento das misturas M2.4 (a) CVR e (b) CVB sob flexão. | 102 |
| Figura 49 – Comportamento das misturas conforme o tamanho do grão e (a) a tensão máxima e (b) capacidade de deflexão. | 104 |
| Figura 50 – Fissuras e microfissuras na área central dos corpos de prova após ensaio de flexão. | 105 |
| Figura 51 – Comportamento das misturas MR (a) CVR e (b) CVB sob carga de tração. | 107 |
| Figura 52 – Comportamento das misturas M0.3 (a) CVR e (b) CVB sob carga de tração. | 107 |
| Figura 53 – Comportamento das misturas M0.6 (a) CVR e (b) CVB sob carga de tração. | 108 |
| Figura 54 – Comportamento das misturas M1.2 (a) CVR e (b) CVB sob carga de tração. | 108 |
| Figura 55 – Comportamento das misturas M2.4 (a) CVR e (b) CVB sob carga de tração. | 108 |
| Figura 56 – Detalhe da fissura principal do corpo de prova de tração. | 110 |
| Figura 57 – Comportamento das misturas conforme o tamanho do grão e a (a) deformação máxima e (b) tensão máxima sob carga de tração direta. | 111 |
| Figura 58 – Relação entre deformação máxima do SHCC e tenacidade à fratura da matriz. | 112 |
| Figura 59 – Corpos de prova de tração ensaiados e as microfissuras contabilizadas. | 114 |
| Figura 60 – Fluxograma com as etapas de estudos no concreto e concreto reparado (concreto + compósito) (AUTORA, 2023). | 115 |
| Figura 61 – Curva granulométrica do agregado miúdo. | 117 |
| Figura 62 – Curva granulométrica do agregado graúdo. | 118 |
| Figura 63 – Betoneira utilizada na concretagem. | 119 |
| Figura 64 – Rugosidade do CP. | 120 |
| Figura 65 – (a) Forma de PVC para o encamisamento do CP de concreto, (b) forma e (c) moldagem dos CPs vazados. | 122 |

| | |
|--|-----|
| Figura 66 – (a) Moldagem e (b) desmoldagem do CP com reforço e do (c) CP vazado..... | 122 |
| Figura 67 – Equipamentos para o ensaio de consistência no concreto. | 124 |
| Figura 68 – (a) Máquina retificadora e (b) prensa utilizada no ensaio de compressão axial..... | 126 |
| Figura 69 – (a) CP com reforço de SHCC nivelado na máquina retificadora e (b) CP de SHCC vazado, nivelado com a técnica de capeamento..... | 126 |
| Figura 70 – Ensaio de compressão axial no CP de 15 x 20 cm reforçado com SHCC. | 127 |
| Figura 71 – Corpos de prova encamisados com SHCC (a) M2.4 e (b) M0.3 rompidos. | 131 |
| Figura 72 – Corpos de prova de SHCC vazados de (a) M2.4 e (b) M0.3 rompidos. | 132 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|-----|
| Tabela 1 – Dimensão da indústria de agregados no Brasil (Adaptado de ANEPAC, 2021). | 28 |
| Tabela 2 – Breve revisão da literatura sobre a utilização de resíduos de rochas. | 37 |
| Tabela 3 – Vantagens, desvantagens e aplicações do SHCC (SHANMUGASUNDARAM E PRAVEENKUMAR, 2021)..... | 43 |
| Tabela 4 – Breve revisão da literatura sobre a utilização de diferentes tipos de agregados no SHCC. | 51 |
| Tabela 5 – Propriedades do cimento CP II-F-40. | 55 |
| Tabela 6 – Composição química da cinza volante (VITAL E MAGALHÃES, 2022). . | 56 |
| Tabela 7 – Massa específica das areias. | 59 |
| Tabela 8 – Propriedades físicas e mecânicas da fibra de PVA. | 60 |
| Tabela 9 – Quantidades dos materiais utilizados na matriz do compósito (kg/m ³). ... | 63 |
| Tabela 10 – Proporção dos materiais utilizados nas misturas..... | 66 |
| Tabela 11 – Quantidades dos materiais utilizados nas misturas dos compósitos, em kg/m ³ | 67 |
| Tabela 12 – Propriedades no estado fresco das misturas da matriz. | 83 |
| Tabela 13 – Valores das propriedades no estado endurecido das misturas da matriz. | 85 |
| Tabela 14 – Valores da resistência à compressão e módulo de elasticidade da matriz. | 87 |
| Tabela 15 – Valores da tenacidade à fratura (Km) e energia de fratura da matriz (Jtip). | 88 |
| Tabela 16 – Valores da resistência por compressão diametral da matriz. | 91 |
| Tabela 17 – Propriedades no estado fresco das misturas do compósito SHCC. | 93 |
| Tabela 18 – Valores das propriedades no estado endurecido das misturas de SHCC. | 94 |
| Tabela 19 – Valores da resistência à compressão axial, módulo de elasticidade e deformação na tensão máxima do compósito SHCC. | 97 |
| Tabela 20 – Valores da compressão diametral do compósito SHCC..... | 99 |
| Tabela 21 – Resultados do ensaio de flexão..... | 102 |
| Tabela 22 – Quantidade de fissuras nos corpos de prova de flexão..... | 106 |

| | |
|---|-----|
| Tabela 23 – Resultados do ensaio de tração direta. | 109 |
| Tabela 24 – Quantidade de fissuras nos corpos de prova de tração direta. | 113 |
| Tabela 25 – Óxidos presentes no cimento Portland..... | 116 |
| Tabela 26 – Quantidade dos materiais utilizados na moldagem do concreto. | 119 |
| Tabela 27 – Propriedades físicas do concreto. | 128 |
| Tabela 28 – Valores da resistência à compressão e módulo de elasticidade do concreto e reparos. | 128 |
| Tabela 29 – Valores da resistência à compressão do conjunto reforçado e do corpo de prova vazado de SHCC, e fator de eficiência do conjunto reforçado. | 129 |

SUMÁRIO

| | |
|---|-----------|
| INTRODUÇÃO | 17 |
| Objetivo Geral | 19 |
| Objetivos Específicos | 19 |
| Estrutura da Dissertação | 20 |
| 1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 21 |
| 1.1 Formação das Rochas | 21 |
| 1.1.1 Rochas ígneas | 22 |
| 1.1.2 Rochas sedimentares..... | 23 |
| 1.1.3 Rochas metamórficas..... | 25 |
| 1.2 As Rochas da Região Metropolitana do Rio de Janeiro | 26 |
| 1.3 Indústria da Mineração de Agregados | 28 |
| 1.4 Produção dos Agregados | 31 |
| 1.5 Resíduo do Processo de Britagem | 35 |
| 1.6 Compósito Cimentícios Reforçados com Fibras do Tipo SHCC | 38 |
| 1.6.1 Ingredientes na mistura do SHCC..... | 45 |
| 1.6.2 Influência da cinza volante no desempenho do SHCC | 46 |
| 1.6.3 Influência dos agregados no desempenho do SHCC..... | 49 |
| 2 DESENVOLVIMENTO DE COMPÓSITOS DO TIPO SHCC | 53 |
| 2.1 Programa Experimental | 53 |
| 2.2 Materiais | 54 |
| 2.2.1 Cimento | 54 |
| 2.2.2 Cinza volante..... | 55 |
| 2.2.3 Agregado miúdo | 57 |
| 2.2.4 Fibra | 59 |
| 2.2.5 Água..... | 60 |
| 2.2.6 Superplastificante | 60 |
| 2.3 Moldagem da Matriz | 62 |
| 2.4 Moldagem do Compósito | 66 |
| 2.5 Ensaio Experimentais na Matriz e no Compósito | 70 |
| 2.5.1 Propriedades no estado fresco..... | 70 |
| 2.5.1.1 Consistência..... | 70 |

| | |
|--|------------|
| 2.5.1.2 Massa específica..... | 72 |
| 2.5.2 Propriedades no estado endurecido..... | 73 |
| 2.5.2.1 Massa específica, porosidade e absorção de água | 73 |
| 2.5.2.2 Resistência à compressão axial | 74 |
| 2.5.2.3 Compressão diametral | 76 |
| 2.5.2.4 Tenacidade à fratura | 77 |
| 2.5.2.5 Flexão..... | 79 |
| 2.5.2.6 Tração direta | 80 |
| 2.6 Resultados e Discussões | 82 |
| 2.6.1 Propriedades da matriz | 82 |
| 2.6.1.1 Propriedades no estado fresco..... | 82 |
| 2.6.1.2 Propriedades no estado endurecido..... | 85 |
| 2.6.1.2.1 Propriedades físicas | 85 |
| 2.6.1.2.2 Resistência à compressão axial | 86 |
| 2.6.1.2.3 Tenacidade à fratura | 88 |
| 2.6.1.2.4 Compressão diametral | 91 |
| 2.6.2 Propriedades dos compósitos | 92 |
| 2.6.2.1 Propriedades no estado fresco..... | 92 |
| 2.6.2.2 Propriedades no estado endurecido..... | 94 |
| 2.6.2.2.1 Propriedades físicas | 94 |
| 2.6.2.2.2 Resistência à compressão axial | 96 |
| 2.6.2.2.3 Compressão diametral | 99 |
| 2.6.2.2.4 Flexão..... | 100 |
| 2.6.2.2.5 Tração direta | 107 |
| 3 APLICAÇÃO DO SHCC PARA O ENCAMISAMENTO DE CONCRETOS | 115 |
| 3.1 Introdução..... | 115 |
| 3.2 Materiais Utilizados na Fabricação do Concreto | 116 |
| 3.2.1 Cimento..... | 116 |
| 3.2.2 Agregado miúdo | 117 |
| 3.2.3 Agregado graúdo..... | 117 |
| 3.2.4 Água..... | 118 |
| 3.3 Moldagem do Concreto..... | 118 |
| 3.4 Tratamento dos Corpos de Prova de Concreto | 120 |
| 3.5 Aplicação do Encamisamento..... | 121 |

| | |
|---|------------|
| 3.6 Ensaaios Experimentais no Concreto e Conjunto Reparado | 123 |
| 3.6.1 Propriedades no estado fresco..... | 123 |
| 3.6.1.1 Consistência..... | 123 |
| 3.6.2 Propriedades no estado endurecido..... | 124 |
| 3.6.2.1 Porosidade, absorção de água e massa específica | 124 |
| 3.6.2.2 Resistência à compressão axial | 125 |
| 3.7 Resultados e Discussões | 127 |
| 3.7.1 Propriedades do concreto | 127 |
| 3.7.2 Propriedades do conjunto reforçado | 128 |
| 4 CONCLUSÕES | 133 |
| REFERÊNCIAS..... | 136 |

INTRODUÇÃO

Os compósitos cimentícios com enrijecimento por deformação, em inglês *strain hardening cementitious composites* (SHCC), é o nome de uma classe especial de compósitos com alta ductilidade. Este compósito foi desenvolvido com base na teoria da micromecânica, resultando em uma elevada capacidade de deformação na tração, enquanto mantém a fração de volume da fibra não superior a 2%. A grande deformação é contribuída pelo desenvolvimento sequencial de múltiplas fissuras, em vez do aumento contínuo da abertura da fissura. Devido a isto, este material é ideal para aumentar a durabilidade das estruturas (WANG E LI, 2007).

O SHCC tem como característica o uso de grandes quantidades de adições minerais na sua fabricação, sendo a cinza volante a mais comumente utilizada. A cinza volante é um resíduo que é obtido a partir do processo de queima de carvão em usinas termelétricas, e tem como principais benefícios na produção do SHCC, a melhora da trabalhabilidade da mistura, aumento da ductilidade do compósito e maior robustez no desempenho na tração (WANG E LI, 2011).

É importante ressaltar que na composição do SHCC é utilizada uma areia com granulometria máxima de 300 μm . No Brasil costuma-se utilizar areia natural peneirada (MAGALHÃES *et al.*, 2009), no entanto, em outras partes do mundo é mais comum o uso de areia industrializada de microssílica (LI, 2008). A areia natural pode ser retirada das várzeas e leitos dos rios, no entanto, a sua extração agride o canal natural, causa erosão nas margens dos rios, altera o equilíbrio hidrológico, destrói as áreas de várzea, elimina espécies vegetais que fornecem alimento para a fauna, e também provoca a perda de refúgios e criadouros, utilizados por aves e pequenos mamíferos (DRAGO, 2009; RUBIN, 2015; GONTIJO, 2019).

As regiões produtoras de areia natural estão localizadas a distâncias cada vez maiores dos centros consumidores, devido ao esgotamento gradual das jazidas próximas, bem como aos conflitos decorrentes da ocupação territorial e também da ação fiscalizadora de entidades ligadas à preservação ambiental (SOARES *et al.*, 1997; VALVERDE, 2018). Tais fatores têm provocado a intensificação da busca e extração deste material em áreas distantes dos locais de demanda, o que ocasiona um aumento no preço da areia devido ao alto custo de transporte. Isso tem incentivado a busca por materiais alternativos tecnicamente adequados para fins construtivos,

com menor custo e que estejam o mais próximo possível dos locais de consumo (TIECHER E MARCON, 2020).

Já a areia de microssílica é relativamente cara e difícil de ser obtida. Isso se deve aos métodos de obtenção, que podem ser superficiais ou subterrâneos, sendo este último mais dispendioso, além do processamento necessário após sua extração para obter um material com a distribuição granulométrica desejada, remover impurezas e melhorar sua qualidade. Ademais, a mineração e o processamento dessa areia podem ter impactos adversos no meio ambiente e na saúde dos trabalhadores e comunidades próximas, incluindo erosão do solo, desmatamento e perda da biodiversidade (SAHMARAN *et al.*, 2009; LARAZ, 2020).

Visando a redução dos impactos ambientais e dos custos associados à extração da areia natural, a utilização de areia de britagem, que é gerada no processo de produção de brita, é uma alternativa viável. Segundo La Serna e Rezende (2019), a utilização da areia de britagem torna-se viável quando há uma curta distância de transporte para a sua comercialização. A britagem de rocha, gera em média 20% de resíduo durante o processo de beneficiamento da brita, sendo conhecido como agregado miúdo de brita, pó de pedra, areia artificial ou areia de britagem (ZANCHETTA, 2000; DRM-RJ, 2012).

A região do estado do Rio de Janeiro é predominantemente composta por rochas cristalinas, abrigando uma ampla extensão de áreas potenciais para atividades de britagem. Com numerosas pedreiras em operação em área próximas ao centro, a região possui uma significativa geração de resíduos, os quais podem ser aproveitados para a produção de areia de britagem (DRM-RJ, 2012).

Segundo Pedroso *et al.* (2017), embora os recursos naturais sejam amplamente utilizados pela indústria da construção civil, esse setor pode se destacar como o mais adequado para incorporar, em sua cadeia produtiva, os resíduos gerados tanto por ele próprio quanto por outros setores.

Neste contexto, este estudo tem como objetivo analisar a viabilidade técnica da substituição da areia natural pela areia do resíduo da britagem na produção do compósito cimentício do tipo SHCC, contribuindo para a redução dos problemas identificados. Portanto, nesta pesquisa utilizou-se areia de britagem na produção do SHCC, que após análise granulométrica, foram definidas 04 (quatro) granulometrias diferentes, que foram: 0,3 mm, 0,6 mm, 1, 2 mm e 2,4 mm, e assim, o comportamento físico e mecânico do SHCC com areia do resíduo de britagem foi analisado e

comparado com um SHCC produzido com areia natural, sendo analisado também a influência da finura da cinza volante no desempenho do SHCC.

Por fim, após análise dos resultados, duas misturas desenvolvidas neste estudo foram aplicadas como reforço em corpos de prova cilíndricos de concreto, por meio do encamisamento, com o objetivo de avaliar o comportamento do SHCC como reforço estrutural.

Objetivo Geral

Verificar a viabilidade técnica da substituição da areia natural pela areia proveniente do resíduo de britagem, com quatro diferentes granulometrias, em novas formulações do compósito cimentício do tipo SHCC. Além disto, avaliar a aplicação deste compósito desenvolvido, como reforço estrutural em concretos por meio da técnica de encamisamento.

Objetivos Específicos

- Analisar a influência da areia de resíduo de brita, em comparação com a areia natural, no comportamento do SHCC;
- Avaliar a influência da granulometria da areia resíduo de brita no compósito SHCC;
- Verificar a influência da finura da cinza volante utilizada na produção dos compósitos;
- Avaliar a aplicação do SHCC desenvolvido, como reforço de concretos por meio da técnica do encamisamento.

Estrutura da Dissertação

O presente trabalho está organizado em cinco capítulos, iniciando com uma introdução, seguida pela apresentação dos objetivos da pesquisa e uma breve descrição da estrutura do trabalho desenvolvido.

No primeiro capítulo é feita uma revisão através da bibliografia, onde é apresentada os principais conceitos no que diz respeito a formação e tipos de rochas, a formação geológica da região metropolitana do Rio de Janeiro, a indústria da mineração de agregados, o resíduo gerado pelo processo de britagem, os compósito cimentícios do tipo SHCC, tipos de aplicação do SHCC e a influência da cinza volante e dos agregados no desempenho do SHCC.

O segundo capítulo detalha o programa experimental desenvolvido para a realização deste estudo, descrevendo as etapas da pesquisa com o auxílio de um fluxograma para melhor entendimento.

No terceiro capítulo é apresentado o desenvolvimento da pesquisa do compósito cimentício do tipo SHCC, onde consta a caracterização dos materiais constituintes, a produção da matriz e dos compósitos, a metodologia dos ensaios realizados e os resultados obtidos dos compósitos e sua matriz.

O quarto capítulo detalha a aplicação do compósito cimentício do tipo SHCC desenvolvido neste estudo como encamisamento de concretos, sendo primeiramente apresentados os materiais e a produção do concreto que irá receber o reforço com os compósitos. Em seguida, é detalhado o tratamento dos corpos de prova de concreto para receber a camada de reforço de SHCC, a aplicação deste reforço, os ensaios experimentais realizados no concreto e no conjunto reparado e a apresentação e análise dos seus resultados.

Por fim, o quinto capítulo apresenta as conclusões obtidas com o desenvolvimento do presente trabalho.

1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

1.1 Formação das Rochas

As rochas são produtos consolidados, resultantes de associações naturais de um ou mais minerais, que tem seus cristais ou grãos constituintes muito bem unidos (MADUREIRA FILHO *et al.*, 2000). Estes produtos estão envolvidas em um ciclo de transformação que pode ser repetido indefinidamente. Então, este ciclo que nunca tem fim, está sempre ocorrendo em diferentes estágios, em várias partes do mundo, formando e erodindo montanhas em um lugar e depositando e soterrando sedimentos em outro (Figura 1) (PRESS *et al.*, 2008).

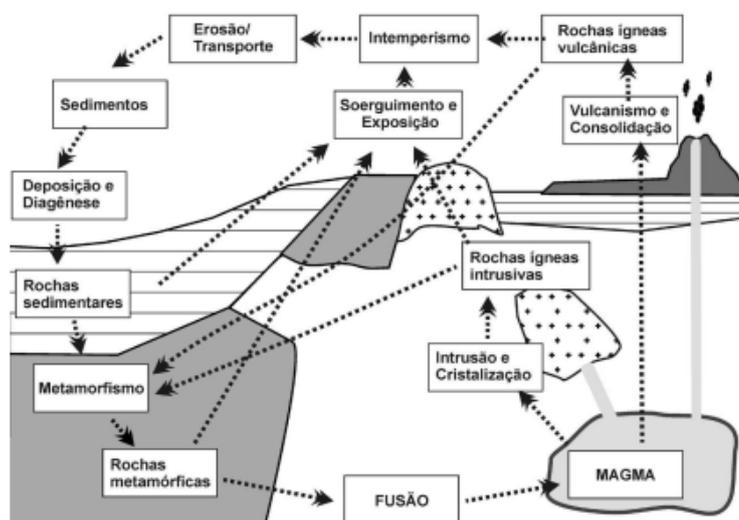


Figura 1 – Ciclo de formação das rochas (LOPES E CARNEIRO, 2009).

Entretanto, observamos apenas parte do ciclo que ocorre na superfície da Terra. Segundo Press *et al.* (2008), a sua classificação é conforme o modo em que são formadas na natureza, podendo ser classificadas em três grupos principais: ígneas (fundidas), sedimentares (que se deposita) e metamórficas (transformadas).

1.1.1 Rochas ígneas

As rochas ígneas ou magmáticas são rochas formadas a partir do magma, que é rocha derretida embaixo da superfície, com profundidade de até 200 km no interior da Terra. Esta formação ocorre através do resfriamento deste magma, que pode acontecer no interior da crosta terrestre, dando origem as rochas ígneas intrusivas, ou pode ocorrer na superfície da crosta terrestre, resultando em rochas ígneas extrusivas. No caso da rocha ígnea extrusiva, esse magma é conhecido como lava, conforme Figura 2 (FERREIRA JÚNIOR, 2021).

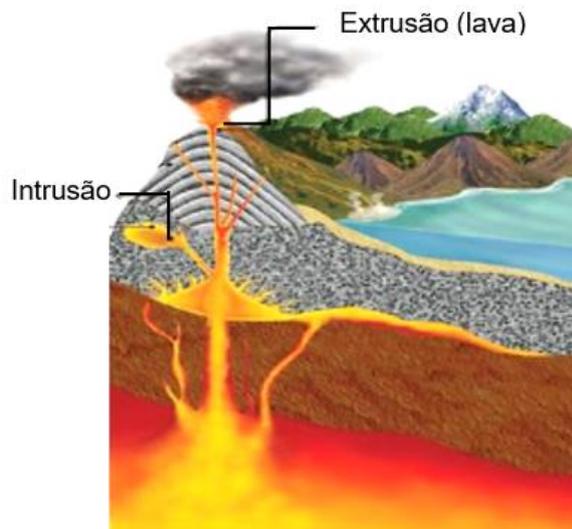


Figura 2 – Esquema de formação de rochas ígneas ou magmáticas (Adaptado de PRESS *et al.*, p. 106, 2006).

As rochas ígneas intrusivas tem como principal tipo o granito (Figura 3a), que é o mais abundante na natureza e geralmente fornece agregados de excelente qualidade para a indústria da construção civil, devido a serem resistentes, terem baixa porosidade e absorção de água (SANTOS *et al.*, 2012). Já com relação a rocha ígnea extrusiva, o basalto é o mais conhecido (Figura 3b). As rochas ígneas possuem a cor bastante variável (PICCOLI *et al.*, 2022).

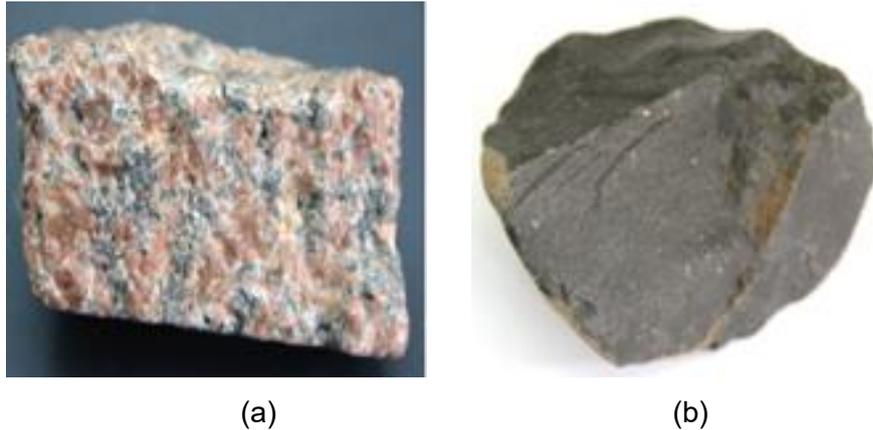


Figura 3 – Rocha de granito (a) e basalto (b) (BOUROTTE, p. 199, 2017).

1.1.2 Rochas sedimentares

As rochas sedimentares para serem formadas, precisam que exista uma rocha anterior, que pode ser ígnea, metamórfica ou mesmo outra rocha sedimentar, que através do intemperismo, fornece sedimentos que podem ser partículas e/ou compostos químicos dissolvidos, que serão a matéria-prima utilizadas para formação da futura rocha sedimentar. A união destas partículas sedimentares se dá através de um processo geológico que é a litificação ou diagênese, que por sua vez é uma combinação dos processos de compactação e cimentação, onde há o acúmulo de camadas destas partículas, que endurecem até virar uma rocha sedimentar (MADUREIRA FILHO, 2000). Na Figura 4, é possível verificar o esquema de formação deste tipo de rocha.

Já o intemperismo, é a decomposição e/ou desintegração de uma rocha já pré-existente, causado por agentes atmosféricos ou biológicos, que são transportadas pela ação dos ventos, das águas que escoam pela superfície, ou pelo gelo, do ponto de origem até o ponto onde serão depositadas como camadas de sedimento no solo ou na água (PRESS *et al.*, 2008). Essa deposição de sedimentos favorece a preservação de espécimes, resultando nos fósseis (PICOLLI *et al.*, 2022).

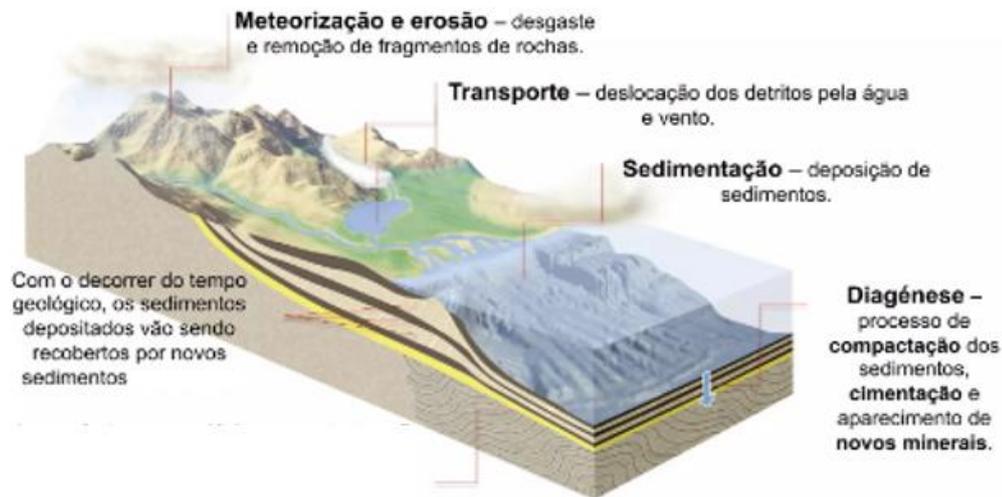


Figura 4 – Esquema de formação de rochas sedimentares (COSTA *et al.*, 2014).

Esse tipo de rocha é amplamente utilizada na construção civil como matéria-prima para diversas indústrias, incluindo a cimenteira, vidraçaria, siderúrgica, além de ser empregada na correção de solos, entre outros usos. Entre as rochas sedimentares mais conhecidas e utilizadas na construção civil temos a areia, arenito que é a areia que ficou cimentada (Figura 5a), argila, calcário e gesso (Figura 5b) (BERTOLINO *et al.*, 2012).

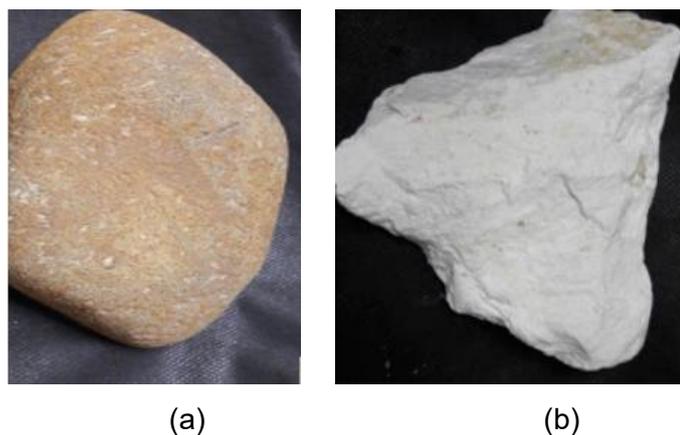


Figura 5 – (a) Arenito e (b) gesso (OLIVEIRA *et al.*, 2013).

1.1.3 Rochas metamórficas

As rochas metamórficas tem sua origem na transformação de uma rocha preexistente, que pode ser ígnea, sedimentar ou até mesmo metamórfica. Este processo geológico ocorre devido ao aumento de pressão ou temperatura resultantes do movimento da crosta terrestre, induzindo a reorganização dos átomos dos minerais até que a rocha alcance um estado de equilíbrio com o novo ambiente. Esse rearranjo resulta em uma nova formação rochosa, apresentando novas propriedades e composição mineral modificada. Ou seja, qualquer rocha pode ser transformada em uma rocha metamórfica, ao passar por intensas mudanças físicas e/ou químicas. Tal transformação ocorre abaixo da superfície da terra, em profundidades extremamente elevadas, sendo zonas completamente inacessíveis, ao contrário de muitas rochas sedimentares e algumas ígneas (MADUREIRA *et al.*, 2000).

Sendo assim, de acordo com Mehta e Monteiro (1994), estas rochas podem ter alteradas a sua textura original, estrutura cristalina ou composição mineralógica. As rochas metamórficas são mais compactas do que as de origem e, conseqüentemente, são mais duras e mais resistentes as ações de erosão e intemperismo. Transformações que ocorrem durante o processo de intemperismo e de litificação, não são consideradas transformações metamórficas pelos geólogos. Na Figura 6, é possível verificar o sistema de formação destas rochas (FERREIRA JÚNIOR, 2021).

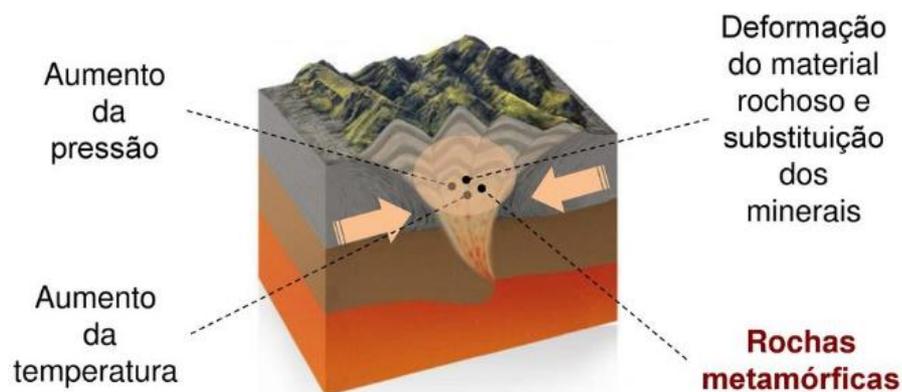


Figura 6 – Esquema de formação de rochas metamórficas (SALSA *et al.*, 2017).

A textura e as estruturas presentes nas rochas metamórficas são determinantes para a sua utilização como agregados. Destacam-se como principais exemplos as rochas gnaisse (Figura 7a), que pode originar-se do granito, que é uma rocha ígnea; a ardósia, formada a partir do xisto, que por sua vez é uma rocha metamórfica; e o mármore (Figura 7b), que é formado a partir do calcário, que é uma rocha sedimentar (BERTOLINO, 2012).

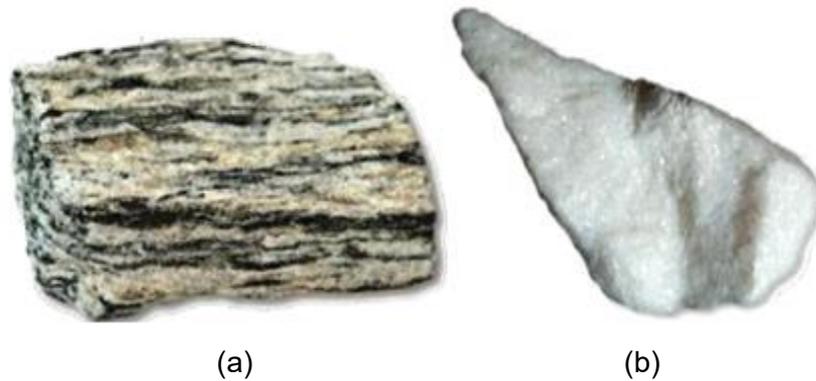


Figura 7 – (a) Gnaisse e (b) mármore (SALSA *et al.*, 2017).

Estas rochas são muito importantes economicamente, sendo amplamente utilizadas na construção civil e na fabricação de objetos. A caracterização dessas rochas é feita de acordo com critérios variados, que envolvem primeiramente a rocha de origem, a sua composição química ou mineral, o tipo e grau de metamorfismo, e aspectos de textura e/ou estruturais. Sendo assim, para a sua correta classificação e caracterização, vários nomes de minerais podem anteceder o nome da rocha, seguindo-se como regra, que os nomes dos minerais mais próximos ao nome da rocha são os que estão em maior abundância na sua composição (WINGE, 1996).

1.2 As Rochas da Região Metropolitana do Rio de Janeiro

O Estado do Rio de Janeiro possui formação geológica muito antiga, representada por rochas pré-cambrianas que é caracterizada pela formação de grandes jazidas minerais e são constituídas por variados gnaisse, migmatitos,

granitos, quartzitos, dolomitos, anfibolitos e aplitos. Seus relevos possuem um núcleo de rochas cristalinas, geralmente granito-gnáissicas, cobertas por um solo residual, em especial na região do município do Rio de Janeiro. A rocha mais característica do Rio de Janeiro é gnaiss lenticular ou facoidal, que por sua vez é classificada quanto a sua formação, como rocha metamórfica (RODRIGUES E MACHADO, 2012).

Ressalta-se que a sua geologia é constituída, em grande parte, por um terreno eminentemente metamórfico, com grandes faixas graníticas (HEILBRON *et al.*, 2016). Ou seja, há a predominância de rochas de granito e gnaiss nesta região. Na Figura 8 é possível ver uma rocha de gnaiss granítico. Estas características favorecem a exploração destas rochas como rochas ornamentais e agregados. Sendo assim, a extração de brita é a principal atividade mineradora desta região, que compreende a Baía de Guanabara. Isto ocorre devido à localização próxima a grandes aglomerações urbanas, aumentando a demanda por esse material (VALERIANO *et al.*, 2012).

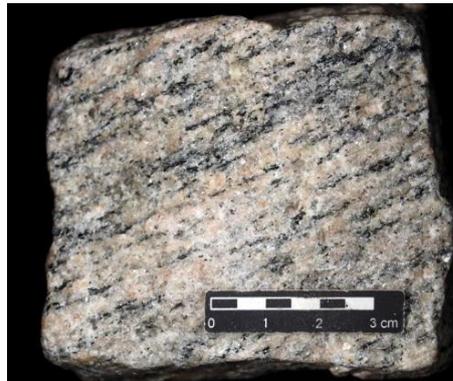


Figura 8 – Gnaiss Granítico (USP, 2023).

Na região metropolitana do Rio de Janeiro, as pedreiras que produzem brita, encontram-se distribuídas principalmente nos municípios do Rio de Janeiro, da Baixada Fluminense, Niterói e São Gonçalo (VALERIANO *et al.*, 2012). O gnaiss possui como principal característica alternância de cores claras em decorrência dos quartzos e feldspato, e escuras devido a biotita, anfibólio e granada. Este tipo de rocha predominante no Estado do Rio de Janeiro, é, em geral, maciça e granular, e serve como agregado de boa qualidade. (BERTOLINO *et al.*, 2012).

1.3 Indústria da Mineração de Agregados

No Brasil, o termo agregado é utilizado para identificar um segmento do setor mineral que produz insumo mineral beneficiado e natural, de aplicabilidade rápida na indústria da construção civil. São principalmente a pedra britada e a areia (VALVERDE, 2001). Quanto a mineração destes agregados, no geral, as reservas minerais de areia e brita ocorrem em abundância no Brasil, assim como sua exploração e produção. Na Tabela 1, é possível ter um panorama da dimensão da indústria de agregados no país, sendo que a região Sudeste é a maior produtora, totalizando 283 milhões de toneladas no ano de 2020, 46,78% da produção total do Brasil (ANEPAC, 2021).

Tabela 1 – Dimensão da indústria de agregados no Brasil (Adaptado de ANEPAC, 2021).

| Ano 2020 | Areia | Brita | Total Agregados |
|--|--------------|--------------|------------------------|
| Produção (milhões t/ano) | 353 | 252 | 605 |
| Produção per capita (t/hab) | 1,6 | 1,2 | 2,8 |
| Número de empresas | 2500 | 600 | 3100 |
| Empregos diretos (x 1.000) | 44 | 26 | 70 |
| Capacidade instalada (milhões t/ano/turno) | 500 | 400 | 900 |

Esta elevada produção acontece devido à grande demanda que o país exige historicamente, e na Figura 9, podemos observar este crescimento do consumo. Entretanto, na grande maioria das regiões, estas reservas estão distantes do grande centro consumidor (FERREIRA E PEREIRA, 2009). O custo de transporte destes agregados, normalmente, é igual ou maior do que os custos da sua produção e no geral, é inviável viabilizar a exploração dos agregados mais próximo possível dos locais de consumo, tanto por questões da disponibilidade e extração do mineral, quanto em relação a questões ambientais (LUZ, 2012; ARQUITÉ *et al.*, 2000).

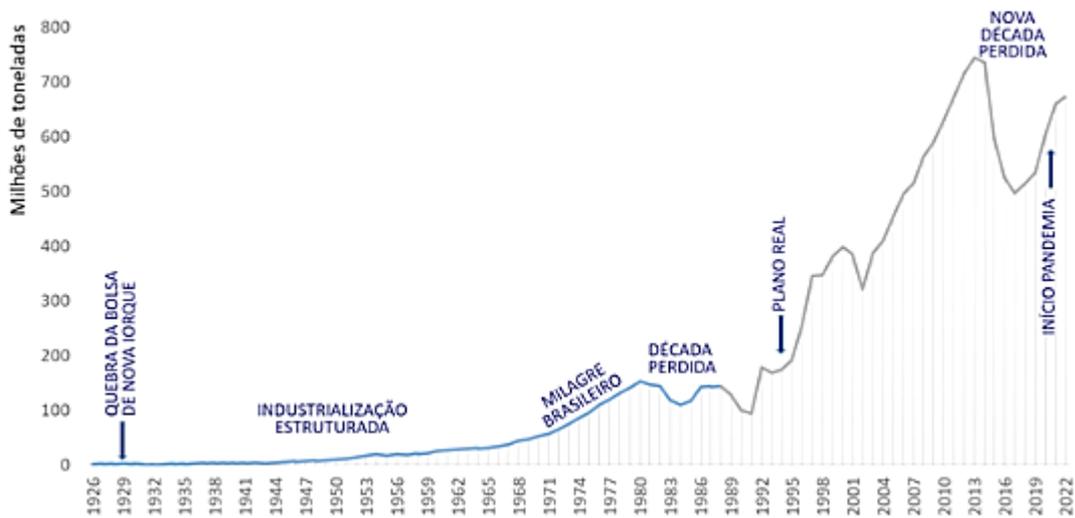


Figura 9 – Demanda histórica do consumo de agregados no Brasil (ANEPA, 2022).

Com relação especificamente a mineração de agregados de rocha britada, quando inserida na malha urbana, causa conflitos entre a população e a pedreira. nos quais a geração de particulados e ruídos são reclamações frequentes. Por mais que a extração destes minerais sejam longe dos grandes centros urbanos, as cidades com o passar dos anos, crescem e se aproximam destes locais (SILVA, 2012). Mas devido ao ordenamento territorial recente nas regiões metropolitanas do país e as restrições ambientais, esta distância das pedreiras ao centro consumidor está em crescimento constante (LUZ E SAMPAIO, 2012).

Quanto as questões ambientais da obtenção da areia, embora a existência da Resolução CONAMA nº 369, os problemas ambientais de conflitos com as comunidades do entorno persistem, devido aos principais impactos gerados por essa atividade, que são: geração de efluentes com particulados nos rios, alteração do nível freático, alteração paisagística, desmatamento, emissão de particulados atmosféricos provenientes do tráfego de caminhões fora de estrada, ruído das máquinas, contaminação da água e solo, assoreamento de rios, extinção de fauna e flora, entre outros. Dependendo da forma de extração desta areia, o passivo ambiental normalmente não é recuperado (QUARESMA, 2009).

E estas restrições ambientais estão fazendo com que mineradores de areia natural, migrem cada vez mais para locais distantes do centro consumidor, contribuindo para a oneração do valor do produto final. A cidade do Rio de Janeiro já é abastecida por mineradoras de areia que estão em média à 100 km de distância,

aumentando em média 75% o valor do custo devido ao transporte (LUZ E ALMEIDA, 2012).

Devido a importância da areia, sendo o recurso mais usado do planeta, ficando atrás apenas da água, foi lançado um relatório pela agência da ONU intitulado de *Sand and Sustainability: 10 strategic recommendations to avert a crisis* (2022), onde apresenta várias orientações de especialistas de todo o mundo, para que sejam adotadas as melhores práticas de exploração e gestão deste recurso. Em suma, as práticas de produção de agregados não diferem de outras práticas industriais e por isso a importância de encontrar soluções para a mitigação destes impactos socioambientais (SILVA, 2012).

Ressaltando que, a atividade de extração dos minerais de areia e brita, para utilização como agregados, é uma das mais importantes do setor mineral brasileiro, devido a este grande volume produzido ser comparado com o minério de ferro, que é o principal produto mineral brasileiro extraído (FERREIRA E PEREIRA, 2009). A produção de brita no Brasil, em sua grande maioria é de rocha de granito e gnaisse totalizando 85% da produção total, os 15% restantes, é de rocha de calcário, dolomito, diabásio e basalto. Quanto à produção de areia, é predominantemente obtida a partir da extração do leito de rios, com uma parcela menor proveniente de várzeas, terraços aluviais, entre outros (SCHMALFUSS *et al.*, 2022).

Quanto à produtividade, a mineração brasileira de agregados ainda tem muito a desenvolver se comparada a dos países da Europa Ocidental e dos EUA, onde grandes investimentos são feitos na modernização das instalações de produção (FERREIRA E FONSECA JÚNIOR, 2012). Na Figura 10, é possível observar a demanda de agregados no Brasil, com um crescimento constante de 6,2% ao ano, atingindo o máximo no ano de 2013. A partir deste ano, houve uma queda que alcançou os 30% de decréscimo no ano de 2017, e após este ano, segue em crescimento até os tempos atuais, sendo projetado um aumento de 3% para o ano de 2023 (ANEPAC, 2022).

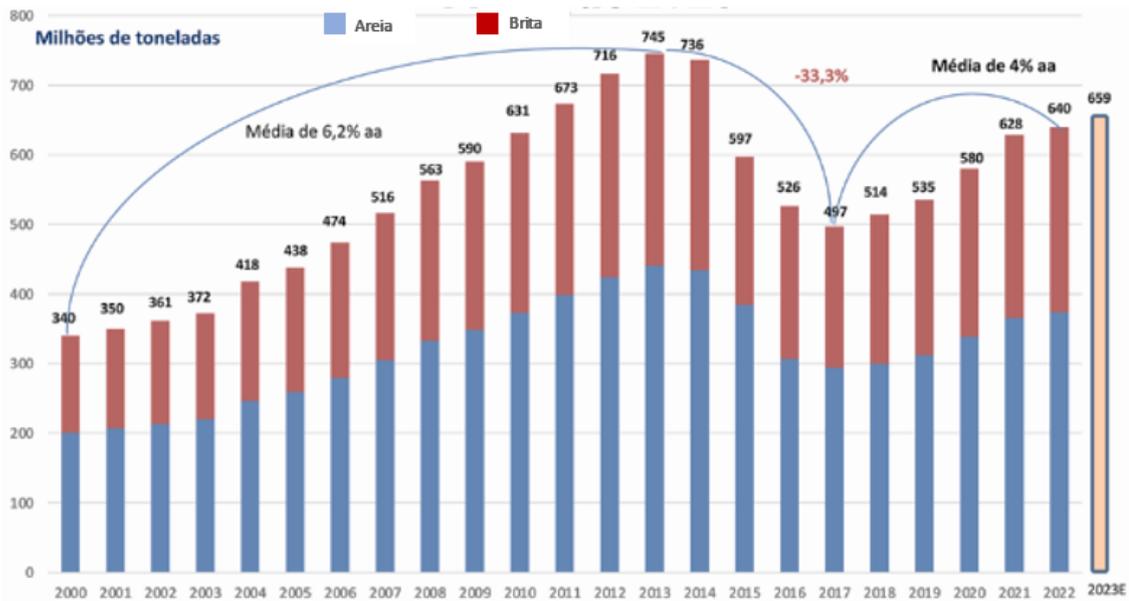


Figura 10 – Demanda por agregados (ANEPAC, 2022).

De modo geral, os produtores de agregados minerais do Brasil, utilizam os procedimentos laboratoriais da Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT, visando a definição das propriedades para o seu uso adequado em concretos e argamassas, podendo ter ou não finalidade estrutural, concreto asfáltico, aterros, entre outros serviços da indústria da construção civil (LUZ, 2012).

1.4 Produção dos Agregados

A função do beneficiamento de rocha é modificar o tamanho das suas partículas, forma e distribuição granulométrica, objetivando o seu uso como agregado na indústria da construção civil. Este processo de modificação das rochas é chamado de britagem, e é possível produzir agregados sem variações de sua qualidade e com as especificações requeridas pelo mercado (LUZ E LINS, 2010). Deste modo, não é comum produzir um agregado específico, para demandas pontuais.

Tradicionalmente no Brasil, o beneficiamento da brita, devido a questões econômicas e a geologia favorável, é feito a céu aberto (ver Figura 11), em encostas ou cava, com o auxílio de explosivos, permitindo menor custo de produção. De uma

maneira geral, a operação de uma pedreira segue a seguinte sequência: retirada da vegetação, do solo e do material estéril; desmonte da rocha; transporte do mineral para as instalações de beneficiamento e britagem da rocha (POLETTTO, 2006).



Figura 11 – Pátio a céu aberto da pedreira Ibrata, com área de lavra ao fundo - RJ.

Geralmente a exploração da rocha é feita por desmonte em sucessivos degraus, com altura média das bancadas variando entre 10 e 20 metros, mas por questões de segurança tende-se a atingir a média máxima de 15 metros de altura, pois, quanto mais alto for, maior o risco de lançamento de fragmentos no momento do desmonte primário. Esta etapa é feita com detonação de explosivos, e estes fragmentos de rocha são transportados para os britadores (POLETTTO, 2006).

Conforme o fluxograma presente na Figura 12, têm-se a britagem primária, secundária e terciária, e assim vai passando por peneiras e obtendo as britas com diferentes granulometrias e pó de brita, sendo que algumas pedreiras ainda produzem areia grossa e fina, e assim, obtém-se o produto final que será transportado por caminhões para a venda.

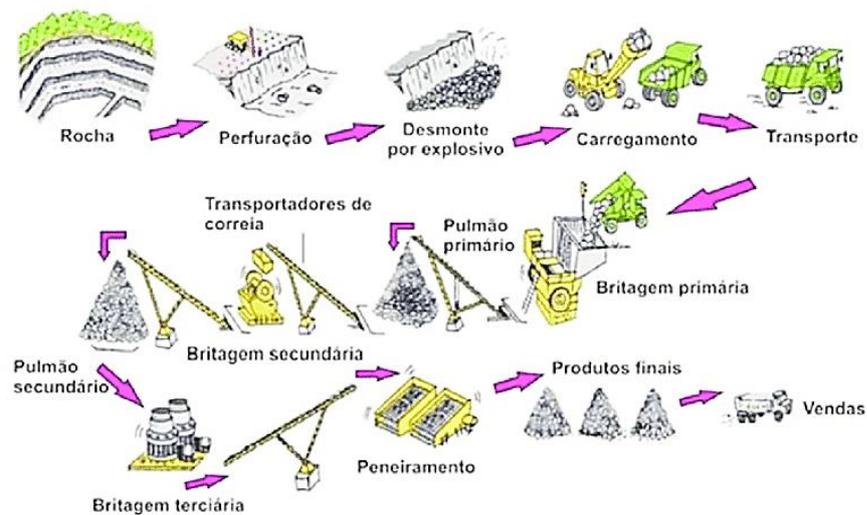


Figura 12 – Fluxograma do processo produtivo de uma pedreira (Adaptado de LAPA, 2006).

Estas operações de beneficiamento são puramente mecânicas e após a extração da rocha, através da detonação, os fragmentos de rocha são transportados para os equipamentos chamados de britadores. Na Figura 13, é possível verificar o processo de britagem, que se inicia pelo britador primário, podendo ser o de mandíbulas, que faz a britagem dos matacões que vem da área de lavra.



Figura 13 – Processo de britagem (Empresa Ibrata).

Após, o material segue por uma correia para o britador secundário que geralmente é do tipo cônico, que faz com que as rochas sejam reduzidas até cerca de 25 mm. Nesta etapa, através do uso de peneiras, produz-se britas que podem variar de 25 mm a 76 mm. A etapa seguinte, chamada de britagem terciária, é utilizada para a produção de britas com dimensão característica de 4,8 mm a 19 mm. A britagem terciária normalmente é feita com britadores de impacto, que podem reduzir a brita até 4,8 mm, e assim como na etapa anterior, a sua classificação é feita com auxílio de peneiras. O transporte de brita entre os britadores, é feito por um sistema de correias transportadoras sempre procurando aproveitar o desnível topográfico para economia na planta de beneficiamento. Em algumas empresas, o fíler de todo o processo passa por um filtro e é transportado para um silo.



Figura 14 – Carregamento do produto final para venda com o auxílio de pá carregadeira (Empresa Ibrata).

Uma alternativa mais econômica consiste na estocagem do agregado em pilhas no próprio pátio e faz-se o carregamento dos caminhões, com o auxílio de pá carregadeira, conforme Figura 14.

Vale destacar que no Brasil, as especificações necessárias, especialmente as granulometrias da brita destinada a cada aplicação, devem estar em conformidade com as normas estabelecidas pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), sendo a norma NBR 7211 (2022) e as referências normativas citadas neste documento que determinam as características necessárias para os diferentes tipos de uso. Salienta-se que a norma NBR 7225 (1993), onde constava a classificação das britas de acordo com as dimensões nominais, como brita 0, 1, 2, 3, 4 e 5, foi cancelada

em janeiro de 2009. Mas, apesar deste cancelamento e a exclusão normativa desta classificação, até o momento atual é comum nas pedreiras, concreteiras e comércio em geral, utilizarem estes termos.

1.5 Resíduo do Processo de Britagem

Os resíduos são produzidos em todos os estágios da vida humana. A maioria dos beneficiamentos de matérias-primas geram resíduos que afetam profundamente o meio ambiente. E isto não é diferente com a indústria da construção civil, que devido a sua grandeza e importância no desenvolvimento da humanidade, torna-se o setor que mais contribui com ações que alteram e afetam o meio ambiente, seja na construção em si ou nas indústrias que fornecem matéria-prima para a mesma.

E é neste cenário que surge a necessidade de busca por matérias-primas alternativas que atendam aos princípios que regem a sustentabilidade. A incorporação de resíduos de britagem compatibiliza a indústria da construção civil com o desenvolvimento sustentável, uma vez que além de reduzir a quantidade de resíduos depositados na natureza, também consegue agregar valor a esses materiais. Então, propor uma utilidade para este rejeito, significa beneficiar o meio ambiente e em contrapartida aumentar o lucro das empresas.

Os resíduos de britagem, comercialmente chamados de pó de pedra, é o rejeito que é gerado durante o processo de fragmentação das rochas para a produção de brita, que representa aproximadamente 20% do volume do produto final (PRUDÊNCIO *et al.*, 1995). Porém, na bibliografia encontram-se diferentes denominações para este resíduo, que pode ser chamado também de pó de brita, areia artificial, areia de britagem, finos de pedreira, finos de britagem e finos de pedra britada.

De acordo com Peracio *et al.* (2018), este resíduo ainda não possui uma destinação final bem definida no Brasil, o que do ponto de vista ambiental, é um grande problema, pois muitas vezes fica estocado em montes ao ar livre, nos pátios das pedreiras, exposto à intempéries, gerando uma série de impactos ao meio ambiente. Contudo, cada vez mais as empresas de britagem de rocha estão procurando formas de reutilizar e/ou comercializar os resíduos gerados na sua

produção, no entanto, até o momento da sua destinação final, eles ficam estocados nos pátios em montes.

No entanto, diante das dificuldades comerciais e ambientais para a comercialização da areia natural, uma parte desta indústria passou a beneficiar e comercializar este resíduo da britagem de rochas como areia artificial, especialmente nas grandes cidades e em regiões metropolitanas, já que o transporte da areia natural até essas regiões, se encontrava inviável economicamente devido à grande distância das jazidas. Entretanto, houve baixo consumo da areia artificial, mas o aproveitamento desse resíduo ainda é uma alternativa válida. O setor tem em vista que, futuramente, a proposta será mais aceita pelo mercado (ANEPAC, 2018).

Então, o reaproveitamento deste material na indústria da construção civil é uma solução extremamente viável devido à redução de problemas associados à extração da areia natural e à disposição dos resíduos de pedreira (NEVILLE, 2015). Talvez a sua pouca utilização, também seja devido à maior oferta de areia natural disponível em todas as lojas de materiais de construção. Também foi verificado que houve uma baixa adoção da areia artificial, principalmente devido à coloração do produto, que diferia do padrão convencional preferido pelos consumidores (ANEPAC, 2018).

Os resíduos da britagem de rochas apresentam características próprias, a depender do tipo de processo de fragmentação, do tipo e estado da rocha, bem como dos parâmetros de operação dos equipamentos de britagem (TERRA, 2000). Segundo a NBR 7211 (2022), a areia de britagem é um material proveniente do peneiramento de britas, com granulometria compreendida entre 4,75 e 0,075 mm. Abaixo desse valor mínimo, temos o que é conhecido como finos de pedreira (CUCHIERATO, 2000).

Além disso, a norma NBR 7211 (2022) fixa as características exigíveis na recepção e produção de agregados miúdos de origem natural, encontrados fragmentados ou resultantes da britagem de rochas.

Estes resíduos de britagem vem sendo empregados no mundo na construção civil desde a década de 80. No Brasil, a utilização deste resíduo ocorreu a partir da década de 80, na construção da hidrelétrica de Itaipu, onde foi utilizado o pó de pedra no concreto, evidenciando suas vantagens técnicas e econômicas (ANDRIOLO, 2005). Com isto, na Tabela 2 é possível verificarmos uma breve revisão de estudos que utilizaram o resíduo de brita na indústria da construção civil.

Tabela 2 – Breve revisão da literatura sobre a utilização de resíduos de rochas.

| Referência | Utilização | Principais Descobertas |
|--------------------------------|--|---|
| Barbosa <i>et al.</i> , 2019. | Pó de rocha calcária em concreto de alto desempenho (CAD). | Traço com menor relação água/material cimentício, obteve melhor desempenho, durabilidade e elevada resistência mecânica aos 28 dias. |
| Menossi, 2004. | Pó de rocha de basalto em substituição a areia natural em concreto. | Resíduo possui as características físicas e químicas necessárias para ser utilizado como agregado miúdo; Possui estabilidade granulométrica; Acréscimo de resistência à compressão; Diminuiu a trabalhabilidade; Maior compactidade (menor permeabilidade), resultando em maior durabilidade. |
| Mohammed e Mupparisetty, 2022. | Pó de brita de rocha de calcário como substituto da areia de rio em argamassas de reparação com três granulometrias distintas (4,75; 2,36 e 1,18 mm). | Trabalhabilidade diminui com a diminuição do tamanho máximo do agregado; Argamassa com pó de brita apresentou maior resistência e durabilidade; As resistências à compressão, flexão e tração reduziram com a diminuição do tamanho do agregado, tanto para areia natural, quanto para o pó de brita (4,75 mm foi o melhor); Resistências à compressão da argamassa com pó de brita são superiores a natural; Capacidade de absorção da argamassa aumenta com a diminuição do tamanho do agregado (pó de brita); As argamassas de areia natural foram mais permeáveis. |
| Sharma e Vyas, 2023. | Pó de granito e pó de britagem de rocha (composta por quartzo, feldspato e mica) como agregado miúdo em argamassas. Uma mistura com 30% pó de granito e 70 % pó de brita e outra com 100% pó de brita. | Misturas com 100% pó de brita apresentaram melhores propriedades mecânicas do que 100 % de areia natural; Uso de 30% do pó de granito, obteve a resistência à compressão conforme parâmetros da norma. No entanto, apresentou aumento da retração por secagem. |
| Santana, 2008. | Areia de resíduos de britagem de rocha ígnea (quartzo monzonito) em concretos de estrutura pré-fabricada. | A incorporação deste resíduo no concreto em 15 %, melhora a resistência à compressão; Já a substituição de até 25% não provoca perda de resistência; Quanto a tração, para idades de 28 dias, há um incremento em seu valor; Uso de resíduo de britagem provoca diminuição dos poros permeáveis e aumento da durabilidade. |

| | | |
|---------------------------|--|--|
| Guimarães e Bastos, 2022. | Substituição da areia natural por areia de resíduos de britagem de rocha granítica em concreto, com três traços distintos. | A combinação de agregado natural e resíduo de britagem apresentam melhores resultados de resistência à compressão e durabilidade; Recomenda-se uso de aditivos superplastificantes na produção de concreto com resíduos de britagem. |
|---------------------------|--|--|

1.6 Compósito Cimentícios Reforçados com Fibras do Tipo SHCC

Segundo Góis (2010), têm-se como material compósito a combinação adequada entre dois ou mais materiais distintos, cujo o objetivo é de aperfeiçoar as propriedades de ambos os componentes. Estes materiais são heterogêneos, e visam obter um material que combinando as características de seus materiais primários de forma racional, obtenha um melhor desempenho que os materiais constituintes primários separados. Schwartz (1984), acrescenta que compósito é um sistema composto pela mistura ou combinação de dois ou mais macro constituintes, que se diferenciam em forma e/ou constituição, sendo insolúveis um no outro (Figura 15).

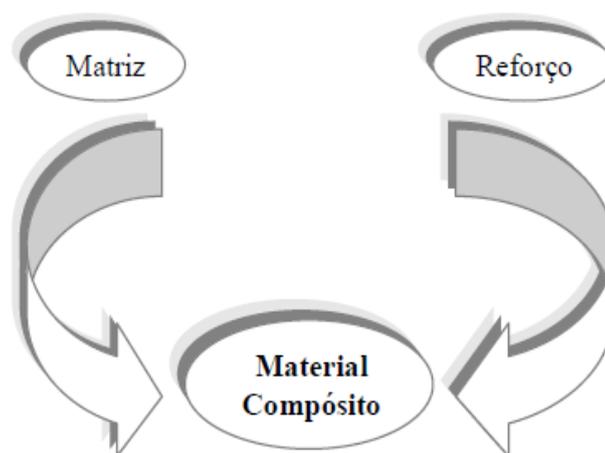


Figura 15 – Esquema de formação de um material compósito (SCHWARTZ, 1984).

Já o termo compósito cimentício é mais específico, onde o seu componente principal é o cimento. Ou seja, um compósito cimentício é um material composto que tem o cimento como um de seus principais constituintes, desempenhando um papel

significativo na composição mineral. Como exemplos mais comuns, temos o próprio concreto, onde outros materiais podem ser incorporados para proporcionar propriedades específicas ao material, como o aço no concreto armado, o concreto reforçado por fibras e o concreto polimérico (CALLISTER E RETHWISCH, 2013).

O compósito do tipo SHCC é uma classe de compósitos cimentícios que apresentam enrijecimento por deformação, do inglês *Strain Hardening Cementitious Composite* (KABELE E KANAKUBO, 2007). Esses compósitos podem ser definidos como um material de matriz cimentícia, comumente reforçada por microfibras poliméricas, sendo a fibra de PVA a mais prevalente, em uma proporção típica de 2% em volume. São caracterizados pelo desenvolvimento de múltiplas fissuras de abertura controlada e pela capacidade de manutenção ou ganho de resistência pós-fissuração (LI, 2008).

De acordo com Naaman e Reinhardt (2006), o comportamento de *strain hardening*, ou aumento de resistência pós fissuração da matriz, faz com que estes materiais se diferenciem dos compósitos cimentícios reforçados por fibras tradicionais, que se caracterizam por queda de resistência pós-fissuração e pela formação de uma única fissura, um comportamento também conhecido como *strain softening*. Ou seja, a invenção do SHCC otimizou a ductilidade do compósito cimentício convencional e abriu um novo campo de materiais cimentícios reforçados com fibras, apresentando excelente capacidade de deformação na tração (LI, 2003).

Segundo Sahmaran e Li (2010), a principal característica que difere o SHCC de um concreto convencional e um concreto reforçado com fibras, é a capacidade de deformação sob tração uniaxial, que pode atingir de 2% a 5%. Isto ocorre através da formação de microfissuras, permitindo uma capacidade de deformação de 300 vezes maior que um concreto convencional. Durante o processo de deformação são formadas microfissuras, com largura controlada inferior a 100 μm , podendo ser reduzidas (para até 20 μm com a utilização de uma matriz adequadamente projetada). Estas fissuras possibilitam que o material apresente o comportamento de enrijecimento por deformação (*strain hardening*), semelhante a muitos materiais dúcteis (LI, 2002; YANG *et al.*, 2007).

É possível observar na Figura 16, a curva tensão-deformação típica de um SHCC, comparado a um concreto convencional. Nota-se que mesmo em carga máxima, a abertura de fissura permanece menor que 80 μm . De acordo com Lepech e Li (2006), isto é possível devido a formação de “fissuras planas” em estado

estacionário, que apresentam abertura constante, independente do seu comprimento, enquanto que no concreto convencional, observa-se que a abertura de uma única fissura, leva o material a ruptura.

De maneira geral, os compósitos SHCC se destacam pela formação de múltiplas fissuras de pequena abertura, as quais têm a capacidade de se fechar parcial ou totalmente ao longo do tempo. Esse fenômeno, conhecido como autocicatrização (*self-healing*) ou autocura, possibilita a recuperação de parte das propriedades mecânicas do material (YANG *et al.*, 2009; LI, 2008).

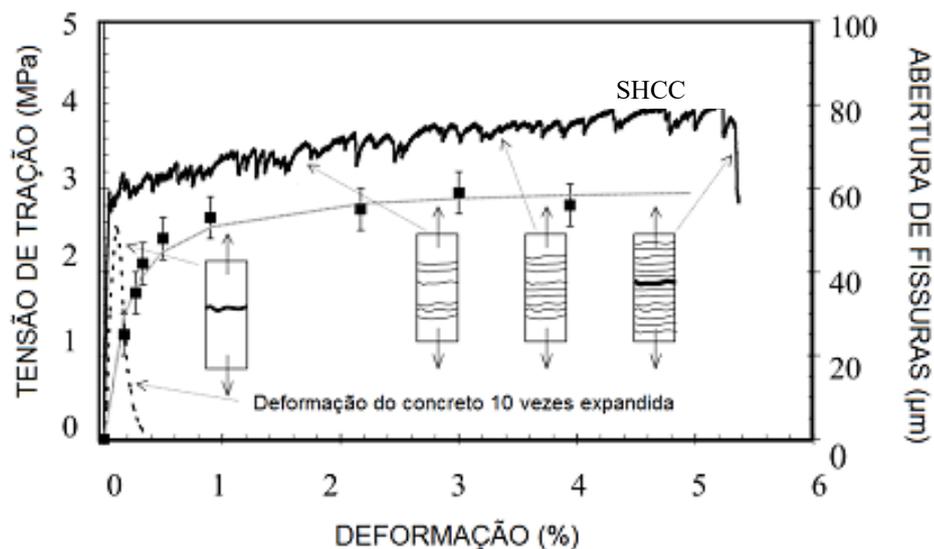


Figura 16 – Curva tensão-deformação à tração e abertura de fissuras características de um SHCC e de um concreto convencional (SAHMARAN E LI, 2009).

Os primeiros registros de compósitos cimentícios com enrijecimento por deformação (SHCC) remontam à década de 70, quando Ali *et al.* (1975) observaram o comportamento de múltiplas fissuras em compósitos cimentícios fabricados com fibras de vidro, variando de 10 a 40 mm de comprimento. Esses compósitos foram produzidos com frações volumétricas entre 2% e 8%, resultando em deformações últimas de até 1%.

Segundo Naaman (2007), o termo "*strain hardening*" foi inicialmente introduzido em 1978 para descrever o aumento de resistência e ductilidade observado em compósitos cimentícios submetidos a ensaios de tração, produzidos com 2% de fibras de aço com ancoragem nas extremidades. No ano seguinte, Naaman e Shah (1979)

também documentaram a ocorrência de múltiplas fissuras em testes de tração direta e flexão realizados em compósitos cimentícios que continham 2,5% de fibras de aço com 25 mm de comprimento, alinhadas na direção da carga.

Já na década de 80, uma tendência que marcou o avanço histórico do desenvolvimento dos compósitos SHCC foi a busca por introduzir volumes cada vez mais significativos de fibras na matriz cimentícia. Assim surgiu o SIMCON (*slurry infiltrated mat concrete*), que é um concreto reforçado com fibras pré-colocadas em forma de manta, que é caracterizado pelo elevado volume de fibras de aço, variando de 5 a 12%. Embora tenham alcançado elevada resistência e deformações, a utilização excessiva de fibras e a necessidade de técnicas especiais de produção, como o processo de infiltração de pasta de cimento, tornaram a produção e aplicação desses materiais economicamente inviáveis (BAYASI E ZENG, 1997).

Assim, no início da década de 90, diversos estudos foram conduzidos com o propósito de otimizar o volume de fibras requerido para a fabricação de compósitos com múltipla fissuração. Esses esforços culminaram no desenvolvimento do compósito cimentício otimizado, do inglês *Engineered Cementitious Composites* (ECC) por Victor Li e colaboradores, na Universidade de Michigan (EUA) (LI E WU, 1992; LI, 1993).

Os ECCs representaram uma nova classe de materiais, produzidos com volumes relativamente baixos de fibras poliméricas, aproximadamente 2%. A inovação desses materiais residia em uma nova abordagem de dosagem fundamentada na teoria da micromecânica e mecânica da fratura, possibilitando não apenas o volume mínimo de fibras necessárias para a ocorrência de *strain hardening*, mas também o equilíbrio das propriedades entre as fibras, a matriz e a interface fibra-matriz (LI *et al.*, 1995; LI *et al.*, 2002; LI, 2012). Esse método permitiu a produção desses compósitos de maneira otimizada, onde os estudos de Victor Li (2003) e sua equipe são considerados um marco significativo no avanço dos compósitos SHCC, pois possibilitaram a adaptação de diversas matrizes para alcançar comportamentos distintos de múltipla fissuração.

Assim, no início do anos 2000, houve uma alteração na nomenclatura dos compósitos com o intuito de estabelecer uma padronização no tratamento pela comunidade científica. A partir deste momento, a sigla SHCC (*Strain Hardening Cementitious Composites*) começou a ser empregada para designar todos os compósitos com comportamento de múltipla fissuração e ganho ou manutenção de

resistência pós-fissuração, abrangendo também o ECC (NAAMAN E REINHARDT, 2006).

Quanto aos materiais componentes do SHCC, são semelhantes a muitos compósitos reforçados com fibras, ou seja, consistem basicamente em uma mistura a base de cimento, areia, água, fibras e uma pequena quantidade de aditivos químicos para melhorar a trabalhabilidade (LEPECH E LI, 2006). Segundo Maalej *et al.* (2012), o SHCC apresenta alta ductilidade, quando reforçado com a quantidade suficiente de fibras descontínuas, e tem como característica a ausência de agregados graúdos, que tendem a afetar negativamente seu comportamento dúctil. Sendo assim, diferentes parâmetros, como a seleção adequada de materiais e processos, e uma aderência fibra-matriz com o deslizamento da fibra, ao invés da ruptura, são responsáveis pelo comportamento dúctil do SHCC (MAGALHÃES, 2010).

O SHCC pode, assim, transformar o modo de fissuração com a formação de uma única fissura, vista comumente em materiais tradicionais à base de cimento sob carga de tração, em um modo de microfissuração com múltiplas fissuras finas, de modo que se possa inibir com eficácia as fissuras estruturais. Ele pode também prevenir a erosão de íons nocivos e, assim, tornando-se um material durável em uma ampla variedade de condições ambientais. No entanto, devido ao elevado custo da produção do SHCC, a substituição completa do concreto pelo SHCC não é economicamente viável para a maioria dos projetos de engenharia, e realizar a aplicação do SHCC apenas localmente é uma solução potencial (SAHMARAN E LI, 2010; MA *et al.*, 2019).

Em relação as propriedades mecânicas do SHCC, de acordo com o Li (2008), o SHCC atinge em média 3 a 7 MPa de resistência na primeira fissura sob cargas de tração, 4 a 12 MPa de resistência à tração, 10 a 30 MPa de resistência à flexão e 18 a 34 GPa de módulo de elasticidade. Quanto a resistência à compressão, segundo Zhu *et al.* (2022), entre 10 e 30 MPa é considerado SHCC de baixa resistência, e de 30 a 80 MPa é considerado de resistência normal. SHCC com valores de resistência à compressão entre 80 e 150 MPa é classificado como SHCC de alta resistência, já acima de 150 MPa é de ultra-alta resistência (LI, 2019).

Com isto, o SHCC é atraente em uma variedade de aplicações de engenharia civil, podendo ser aplicado em construções feitas *in loco* ou em materiais pré-moldados (WANG E LI, 2007). Na Tabela 3 é possível verificar algumas vantagens, desvantagens e possíveis locais de aplicação do SHCC.

Tabela 3 – Vantagens, desvantagens e aplicações do SHCC (SHANMUGASUNDARAM E PRAVEENKUMAR, 2021).

| Vantagens | Desvantagens | Locais de Aplicação |
|---|---|--|
| Flexível e comportamento de enrijecimento por deformação | Custo inicial alto | Estruturas resistentes a terremotos |
| Mais resistente e durável que o concreto convencional | Exige mão de obra experiente e/ou qualificada | Obras de reparação e reabilitação |
| Alta capacidade de controle de fissuras | Menor viabilidade de disponibilidade de materiais especiais como areia de sílica e fibras | Estruturas resistentes a ácidos ou produtos químicos |
| Capacidade de autocura | A menor redução da qualidade dos componentes, podem afetar suas propriedades | Estruturas hidráulicas ou de alta durabilidade |
| Leve devido a evitar agregados graúdos | Menor módulo de elasticidade comparado ao concreto convencional devido à falta de agregado graúdo | Construção costeira com climas quentes e áridos |
| Usado como material de reparo | A seleção de materiais bons e adequados é difícil para atingir a resistência desejada | Ponte, estradas e pavimento de aeroporto |
| Alta sustentabilidade com utilização de subprodutos industriais e agropecuários | Elevado teor de cimento devido à falta de agregado graúdo, o que aumentará indiretamente o custo e as emissões de efeito estufa | Tubulações de alta pressão ou de transporte de carga |

Uma aplicação potencial dos compósitos do tipo SHCC é em reparos e reforços, pois podem proporcionar ganho de resistência em áreas sujeitas a tração, mesmo em condições de elevada deformação, e contribuir para melhorar a durabilidade da estrutura ao reduzir a abertura das fissuras, diminuindo assim a penetração de agentes agressivos (SCHRÖFL et al., 2015; LI E MISHRA, 1996).

Rokugo *et al.* (2005) investigaram a utilização de SHCC no reparo de uma estrutura de contenção com várias fissuras. Esta estrutura já havia sido reparada por meio de injeção de fissuras e técnicas de sobreposição em 1994, mas, antes de 2002

(ver Figura 17a), as fissuras voltaram a ocorrer na superfície. Com o objetivo de prevenir a ocorrência de fissuras superficiais no novo material de reparo, foi utilizado o SHCC (ver Figura 17b). Os pesquisadores acompanharam a evolução das fissuras na superfície reparada com SHCC ao longo de 12 meses e constataram que as aberturas das fissuras nessa camada eram significativamente menores do que aquelas observadas no substrato antes da aplicação do novo reparo. Isso evidencia as vantagens do uso desse tipo de material em operações de reparo.



Figura 17 – Muro de Contenção localizado na região de Gifu no Japão, (a) antes da aplicação do reparo e (b) logo após a aplicação do reparo (ROKUGO *et al.*, 2005).

Através de estudos, Zhang *et al.* (2006) avaliaram os impactos da aplicação de camadas de SHCC no reforço de vigas de concreto, apresentando também uma formulação analítica para modelar o problema. Os autores demonstraram que a aplicação de uma camada de SHCC na face sujeita à tração das vigas eleva sua resistência à flexão, e esse efeito se intensifica com o aumento da espessura do material de reforço aplicado.

Já Kamal *et al.* (2008), estudaram o uso de SHCC como material de reparo para vigas de concreto armado, aplicando camadas desse material na parte inferior de vigas pré-fissuradas. Os resultados demonstraram que a presença de SHCC na região fissurada do substrato retardou significativamente a abertura das fissuras existentes, contribuindo assim para a durabilidade do elemento estrutural. Também foi estudado por Kamada e Li (2000) a influência da superfície onde o reparo é

aplicado, e os pesquisadores demonstraram que superfícies mais rugosas retardam o descolamento da camada de reparo, permitindo um resultando mais eficaz.

1.6.1 Ingredientes na mistura do SHCC

A mistura de SHCC mais amplamente usada ao redor do mundo, foi desenvolvida por Wang e Li (2007), onde os ingredientes usados na matriz cimentícia são o cimento Portland comum (ASTM Tipo I), cinza volante classe F e areia fina de sílica (microssílica). Como reforço da matriz são utilizadas fibras de PVA.

A presença de fibras no SHCC desempenha um papel fundamental na redistribuição de tensões após a formação de fissuras, pois atuam como reforço, transferindo as tensões ao redor das fissuras e impedindo sua propagação descontrolada. Sendo assim, a matriz do SHCC é reforçada com fibras curtas (6-12 mm de comprimento), onde a adição máxima é de 2% e sua distribuição é de forma randômica. Na sua composição, vários outros tipos de fibras já foram utilizadas, além das fibras de álcool polivinílico (PVA), como as fibras de polietileno (PE) e fibra de polipropileno (PP). Mas, devido à sua boa dispersibilidade e adequadas propriedades, a fibra de PVA é mais comumente utilizada (LI, 2002).

O projeto de mistura do SHCC tradicional, conforme citado anteriormente, exclui agregados graúdos e é projetado usando areia de microssílica com o intuito de reduzir a tenacidade da matriz e aumentar a fissuração múltipla. No entanto, a inclusão de fibras e baixo teor de areia fina contribuem para o custo mais elevado deste tipo de compósito do que do concreto convencional.

O SHCC apresenta como característica na sua composição, maior teor de cimento quando comparado ao concreto convencional. Esse elevado teor, tipicamente duas ou três vezes maior, é consequência da necessidade de facilitar a dispersão das fibras e do controle da tenacidade da matriz, onde o comportamento de múltipla fissuração depende disto. A presença de cinza volante na mistura do SHCC, no geral, reduz a abertura da fissura e torna a ductilidade na tração mais robusta quando utilizado em altos teores (MAGALHÃES *et al.*, 2009).

Diferentes tipos de adições minerais já foram utilizadas na composição do SHCC, além da habitual cinza volante. Huang *et al.* (2013) utilizaram pó de rejeito de

minério de ferro como substituto do cimento. Altwair *et al.* (2012) usaram cinzas da combustão de óleo de palma em até 55% da massa de cimento. Zhou *et al.* (2010) usaram sílica ativa e escória de alto forno como material cimentício. Junxia e Yang (2017) e Qiu e Yang (2017) usaram escória granulada de alto forno. Kawamata *et al.* (2003), Maalej *et al.* (2005) e Deng e Qian (2018) usaram sílica ativa. Santana (2023) utilizou metacaulinita na composição do SHCC, já Rangel (2024) utilizou uma blendagem de cinza volante e metacaulinita.

De acordo com Li (2002), devido a elevada quantidade de finos na mistura, a sua trabalhabilidade é afetada e há a necessidade de utilizar superplastificantes para produzir misturas com trabalhabilidades adequadas.

Shangmugasundamaram e Praveenkumar (2021) relataram que a seleção inadequada de materiais com diferentes propriedades físicas e químicas, condições de cura e proporções da mistura, afetam negativamente as propriedades frescas e mecânicas do SHCC. Para obter as corretas propriedades do SHCC, o uso dos materiais precisa ser estudado detalhadamente. Além disso, o efeito das condições de cura, os detalhes da condução dos experimentos, assim como os métodos são muito importantes para alcançar as suas melhores propriedades.

1.6.2 Influência da cinza volante no desempenho do SHCC

O uso de materiais cimentícios suplementares tem sido reconhecido como ingredientes promissores para melhorar o desempenho dos compósitos. Alguns são produzidos intencionalmente, como a metacaulinita, enquanto outros são resíduos de diferentes indústrias. A cinza volante (CV) é o material cimentício suplementar mais frequentemente utilizado no SHCC (SHOJI *et al.*, 2022).

A incorporação de cinza volante na mistura do SHCC é importante, devido à melhora no seu comportamento na tração direta, principalmente na deformação ao longo do tempo. Produzida como resíduo da combustão do carvão em usinas termoelétricas, tem também como vantagens a mitigação da taxa de liberação do calor de hidratação, a redução das emissões de CO₂ e a redução da energia incorporada. Os materiais que utilizam a cinza volante na sua composição apresentam menos riscos de fissuração térmica, resultando em melhoria da durabilidade a longo prazo.

Existe uma variedade de tipos de cinza volante ao redor do mundo, com diferentes características. De uma forma geral, ela tem sido utilizada na forma residual ou beneficiada, onde a diferença fundamental está no processo pela qual cada uma passa antes de ser utilizada (MAGALHÃES *et al.*, 2023). A residual, é a cinza obtida diretamente da queima de carvão mineral nas usinas termelétricas. Já a beneficiada é a cinza volante que passa por processos adicionais para melhorar suas características físicas e químicas. Esse beneficiamento pode envolver a moagem, separação de partículas mais finas, remoção de impurezas indesejadas e outras técnicas para aprimorar suas propriedades (YU *et al.*, 2018; NOGUEIRA, 2011).

Kan *et al.* (2019) estudaram o efeito da finura e do teor de cálcio nas cinzas volantes nas propriedades mecânicas do SHCC, e concluíram que a capacidade de deformação por tração e a resistência à compressão não aumentaram com o aumento da finura. No entanto, com o aumento da finura da cinza volante era esperado o aumento da resistência à compressão, não necessariamente o aumento da sua capacidade de deformação. Diante desse resultado contraditório, os autores sugeriram que pode ser devido à redução da atividade química em razão da forma como foi feita a moagem da cinza volante e não à sua finura. Ou seja, embora o tamanho da partícula fosse menor, a capacidade e a atividade de sua hidratação foram reduzidas. Este resultado também foi creditado ao fato do baixo teor de cálcio da cinza volante utilizada na pesquisa.

Já estudos conduzidos por Kiattikomol *et al.* (2001) indicam que a finura da cinza volante teve mais influência na resistência à compressão de argamassas, do que a composição química das cinzas volantes obtidas de diferentes fontes. Raask e Bhaskar (1975) verificaram que a atividade pozolânica das cinzas varia com a finura e é proporcional ao quadrado da superfície específica. Krishnaraj *et al.* (2020) estudou cinzas volantes ultrafinas (CVU) produzidas mecanicamente, e concluiu que o aumento na atividade da CVU foi associado à sua contribuição para uma matriz mais densa e com menor porosidade total na pasta de cimento.

Na verdade, numerosos resultados experimentais revelaram que as cinzas volantes mais finas melhoram a resistência à compressão em argamassas (HSU *et al.*, 2018; CHOI *et al.*, 2012; HAN *et al.*, 2019) . Também geram maior calor de hidratação e consomem mais hidróxido de cálcio em comparação com cinzas volantes de granulometria mais grossa (HAN *et al.*, 2019). Esse consumo adicional de hidróxido de cálcio pode ter implicações positivas como uma maior durabilidade do compósito.

Além disso, a presença de cinzas volantes de granulometria mais fina, como já falado anteriormente, contribui significativamente para a melhoria da resistência à compressão (CHOI *et al.*, 2012) e esse efeito é principalmente atribuído à reação pozolânica aprimorada e ao efeito de enchimento físico das partículas finas de cinzas volantes (HAN *et al.*, 2019).

Sendo assim, fica evidenciado na literatura que a finura das cinzas volantes constitui um dos principais parâmetros que governam a atividade pozolânica da cinza volante. E geralmente, o aumento da sua finura é extremamente vantajoso para as propriedades dos concretos e argamassas com cinza volante (SUN E LEE, 2020; HAN *et al.*, 2019; CYR *et al.*, 2006).

Segundo Kumar e Ranade (2021), os benefícios da inserção de cinza volante em misturas de SHCC, deve-se ao fato de que o alto teor de cinza volante na mistura tende a reduzir a aderência química na interface fibra-matriz e a tenacidade da matriz, em favor de atingir alta capacidade de deformação por tração. Podemos citar também como benefício a obtenção de uma boa dispersão e uniformidade das fibras. Assim, têm-se a possibilidade de produzir misturas com maiores teores de areia e também com tamanho maior dos grãos, sem prejudicar o seu comportamento dúctil.

Ainda de acordo com Kumar e Ranade (2021), as cinzas volantes são usadas como materiais suplementares na produção do SHCC e reagirá com os subprodutos da hidratação do cimento. As partículas de cinza volante que não reagirem funcionarão como filer e, posteriormente, poderá promover uma autocicatrização no compósito fissurado. Assim, o uso de cinza volante pode melhorar drasticamente o desempenho do compósito, com melhora da ductilidade, na tenacidade e no ganho de resistência em idades avançadas (TERMKHAJORNKIT *et al.*, 2009).

Apesar de todos os benefícios do uso de cinza volante na mistura do SHCC, estudos indicam que as propriedades do SHCC podem ser afetadas, devido a variabilidade da composição da cinza volante disponível no mundo. Tosunfelekoglu *et al.* (2017) constataram que as propriedades físicas e químicas da cinza volante afetam diretamente o desempenho dos compósitos, tanto no estado fresco quanto no estado endurecido. Quanto a sua quantidade na mistura de SHCC, embora os pesquisadores tenham estudado proporções em massa de cinza volante em relação ao cimento (CV/C), variando de 0,1 a 5,6, a proporção CV/C mais comumente usada é de 1,2, equivalente a aproximadamente 30% do volume do compósito (KUMAR E RANADE, 2021).

1.6.3 Influência dos agregados no desempenho do SHCC

Sabe-se que a alta ductilidade do SHCC é alcançada otimizando os parâmetros microestruturais da matriz, fibra e sua relação interfacial. Os agregados desempenham um papel importante na matriz e, portanto, têm uma influência significativa nas propriedades do SHCC (LI E LEUNG, 1992).

No geral, os agregados ocupam uma fração volumétrica importante em materiais à base de cimento e, portanto, têm efeitos consideráveis em diferentes aspectos das propriedades do material. Além de seu papel como enchimento econômico, os agregados ajudam a controlar a estabilidade dimensional de concretos e argamassas, que podem ser considerados como consistindo de uma estrutura de pasta de cimento com movimentos de retração, restringidos pelas partículas do agregado. De acordo com os princípios do projeto micromecânico do SHCC, para alcançar o enrijecimento por deformação, a tenacidade à fratura da matriz deve ser limitada. Portanto, apesar dos efeitos positivos dos agregados na estabilidade dimensional e na economia destes compósitos, existem limites no tamanho das partículas dos agregados (SAHMARAN *et al.*, 2009).

Assim, observa-se que na presença de fibras, a introdução de agregados com tamanho de partícula maior que o espaçamento médio das fibras, leva ao emaranhamento, maior aglomeração e à maior interação com as fibras na pasta, e o efeito se torna mais pronunciado à medida que o tamanho máximo das partículas aumenta. Portanto, o aumento no tamanho das partículas torna mais difícil conseguir uma dispersão uniforme das fibras e dificulta a trabalhabilidade da mistura fresca.

Além disso, a presença de agregados numa matriz de cimento tende a aumentar a tortuosidade do caminho de fratura e, portanto, a tenacidade à fratura da matriz (Nallthambi *et al.*, 1984). De acordo com Perdikares e Romeo (1995), o aumento na tenacidade à fratura com o aumento do tamanho das partículas dos agregados tem como resultado o aumento da resistência à propagação da fissura. Portanto, espera-se que o tamanho das partículas tenha uma influência significativa nas propriedades de fratura da matriz. Por estas razões, a produção de misturas de SHCC tem a ausência do agregado graúdo e tem sido restrita ao uso de um agregado fino (NALLTHAMBI *et al.*, 1984; SOROUSHIAN *et al.*, 1992).

Segundo Li *et al.* (2001), uma fração elevada de areia também prejudica o comportamento do SHCC, devido a presença da areia causar um aumento na tenacidade à fratura e aumento da aderência friccional entre a fibra e a matriz, causando abrasão das fibras e uma deterioração em sua capacidade de transferir tensões ao longo da fissura. O autor sugere que esse efeito pode ser reduzido ao diminuir a granulometria do agregado.

Segundo Lepech *et al.* (2008), com base no modelo micromecânico do SHCC, a areia de sílica fina (microsílica), com tamanhos de grãos médio e máximo de 110 e 250 μm , respectivamente, é amplamente utilizada neste tipo de compósito. No entanto, a sua disponibilidade é limitada pela localidade. Esta areia, extremamente fina, impõe influência negativa na retração e na aplicação prática do SHCC, assim como, contribui para o custo mais elevado deste compósito em comparação com o concreto convencional, em decorrência ao seu custo e indisponibilidade em diversas áreas (LI *et al.*, 1995).

Com o objetivo de aliar economia e/ou sustentabilidade sem perder os principais benefícios do SHCC, diversos pesquisadores estão estudando a substituição parcial ou total da areia de microsílica, comumente utilizada na mistura do SHCC, por diversos tipos de agregados, e alguns com diferentes granulometrias, conforme mostra a Tabela 4.

Tabela 4 – Breve revisão da literatura sobre a utilização de diferentes tipos de agregados no SHCC.

| Referência | Material | Principais Descobertas |
|-----------------------------|---|---|
| Paul e Van Zijl, (2013) | Areia natural - Areia fina com classificação ASTM F95 (Dmáx. 300 µm) e areia grossa (Dmáx. 1,7 mm e 2,36 mm) | Os valores de resistência à compressão foram maiores tanto na matriz, quanto no SHCC nas misturas com areia fina; SHCC com areia grossa apresentou maior resistência à flexão do que com a areia fina; Areia grossa apresentou menor deformação final nos ensaios de flexão e tração direta; Foi encontrado menor número de fissuras e maiores aberturas nos CPs de tração direta com areia grossa; Maior tamanho das partículas de areia, resulta em maior tenacidade à fratura, tanto da matriz, quanto do SHCC e menores módulos de elasticidade. Isto ocasiona aumento da abertura das fissuras que é prejudicial ao critério de energia. |
| Li e Yang, (2017) | Finos de concreto reciclado (FCR) (Dmáx.: 300, 600, 1180 e 2360 µm) | Quando o tamanho do grão de FCR aumentou de 300 para 600 µm, a resistência à compressão reduziu de 53 MPa para 42,50 MPa; Já quando aumentou para 1180 e 2360 µm, a resistência à compressão retornou ao nível de 50 MPa; A resistência à flexão e capacidade de deformação diminuíram com o aumento do teor de FCR, isto é atribuído ao aumento da tenacidade a fratura; O comportamento da tenacidade da matriz, foi semelhante ao de compressão; A tenacidade da matriz aumentou com o aumento do tamanho do agregado e também com o aumento do teor de FCR. |
| Meng <i>et al.</i> , (2017) | Areia de dunas (Dmáx. 300 µm) | Resistência à compressão de 59,86 MPa, que é comparável ao típico SHCC (65 a 70 MPa); Resistência à flexão média foi de 9,50 MPa, valor superior ao típico SHCC (8,71 MPa); Resistência à tração foi de 5,17 MPa, que é superior ao típico SHCC (média de 4,5 MPa); Capacidade de deformação à tração teve valor de 0,77%, que é menor que o típico SHCC (4%). |

| | | |
|---|---|--|
| Huang <i>et al.</i> , (2014) | Areia de dunas (Dmáx. 300 µm) | Resistência à compressão aos 14 dias foi de 48,2 MPa e aos 42 dias foi de 66,4 MPa, comparável ao típico SHCC (57,8 MPa a 62,5 MPa aos 28 dias); Resistência à tração aos 14 dias foi de 5,17 MPa, maior que o típico SHCC que é de 4,41 MPa aos 14 dias; Capacidade de deformação à tração variou de 1,7% a 2,4% aos 7 dias, menor do que do típico SHCC que é 3,48% na mesma idade. |
| Chandrasekar e Ransinchung, (2023) | Areia industrializada – Módulo de finura da areia grossa é de 2,74 mm e da areia fina é de 1,93 mm) | Em comparação a areia de rio, o SHCC com a areia industrializada grossa aumentou a resistência à compressão em 29% e com a areia industrializada fina não aumentou; O uso da areia industrializada aumentou a resistência à tração, mas reduziu a capacidade de deformação à tração com ambos os tamanhos dos grãos, em comparação a areia de rio; A tenacidade da matriz das misturas com areia grossa e fina foi aumentada em aproximadamente 52% e 32% em comparação com a areia de rio. |
| Sahmaran <i>et al.</i> , (2009) | Areia industrializada - Areia calcária britada e areia de cascalho (Dmáx. 1,2 e 2,4 mm) | A resistência à compressão em ambas as areias foram menores do que o SHCC típico; O aumento do tamanho máximo do agregado, não levou a um aumento significativo da resistência à compressão; A capacidade de deformação por tração é ligeiramente maior da areia de cascalho em comparação a areia britada com o mesmo tamanho de agregado; O uso de areia britada com estes tamanhos máximos de grãos, pode reduzir a retração por secagem, melhorando ainda mais o comportamento do material. |
| Guan <i>et al.</i> , (2019) | Areia de rio - Areia grossa (Dmáx. 4,75 mm e 2,36 mm) | A substituição de areia de sílica ultrafina por areia de rio não influenciou significativamente a resistência à compressão; Deformação média de tração da mistura com areia grossa de rio com tamanho máximo dos grãos de 4,75 mm foi de 9%, similar ao da mistura com areia de sílica ultrafina; Aumentou a tenacidade a fratura com o aumento do tamanho máximo do grão da areia; Custos do SHCC foi reduzido em mais de 10% ao substituir areia de sílica por areia de rio. |

Nota: Dmáx.: tamanho máximo do grão.

2 DESENVOLVIMENTO DE COMPÓSITOS DO TIPO SHCC

2.1 Programa Experimental

Este capítulo apresenta o programa experimental utilizado na dissertação, o que envolve a descrição dos materiais empregados neste estudo, a metodologia utilizada no preparo das amostras e os ensaios experimentais realizados no Laboratório de Engenharia Civil da UERJ.

Conforme os objetivos estabelecidos nesta pesquisa, elaborou-se um programa experimental para avaliar o desempenho de compósitos do tipo SHCC, em que a areia natural foi substituída por areia proveniente de resíduo de britagem, com granulometrias de 2,4 mm, 1,2 mm, 0,6 mm e 0,3 mm.

Adicionalmente, considerando que a configuração típica do SHCC envolve a mistura de cimento e cinza volante, como material cimentício suplementar, conduziu-se uma análise para examinar como a utilização de distintas cinzas volantes influenciam o comportamento do SHCC. Assim, nessa pesquisa foram utilizados dois tipos de cinza volante, a cinza volante residual e uma cinza volante beneficiada, a qual foi obtida por moagem dos grãos da cinza volante residual.

Dessa forma, foram realizados diversos ensaios para a caracterização física e mecânica das misturas de SHCC desenvolvidas nesta pesquisa e respectivas matrizes, após 28 dias de idade. Os ensaios realizados nos compósitos foram de massa específica, porosidade, absorção de água, compressão axial, compressão diametral, flexão e tração direta, e os ensaios realizados nas matrizes dos compósitos foram de tenacidade à fratura, compressão axial, compressão diametral, massa específica, porosidade e absorção de água.

Posteriormente, visando analisar o comportamento prático do SHCC ao substituir a areia natural pela areia de resíduo de britagem, simulou-se sua aplicação como reparo estrutural em corpos de prova cilíndricos. Para isto, foi feito o encamisamento de corpos de prova de concreto com duas formulações de SHCC, selecionadas entre as misturas que apresentaram melhor desempenho. Esta etapa do estudo será detalhada no Capítulo 3.

A Figura 18 apresenta o fluxograma com as etapas da pesquisa, para melhor entendimento.

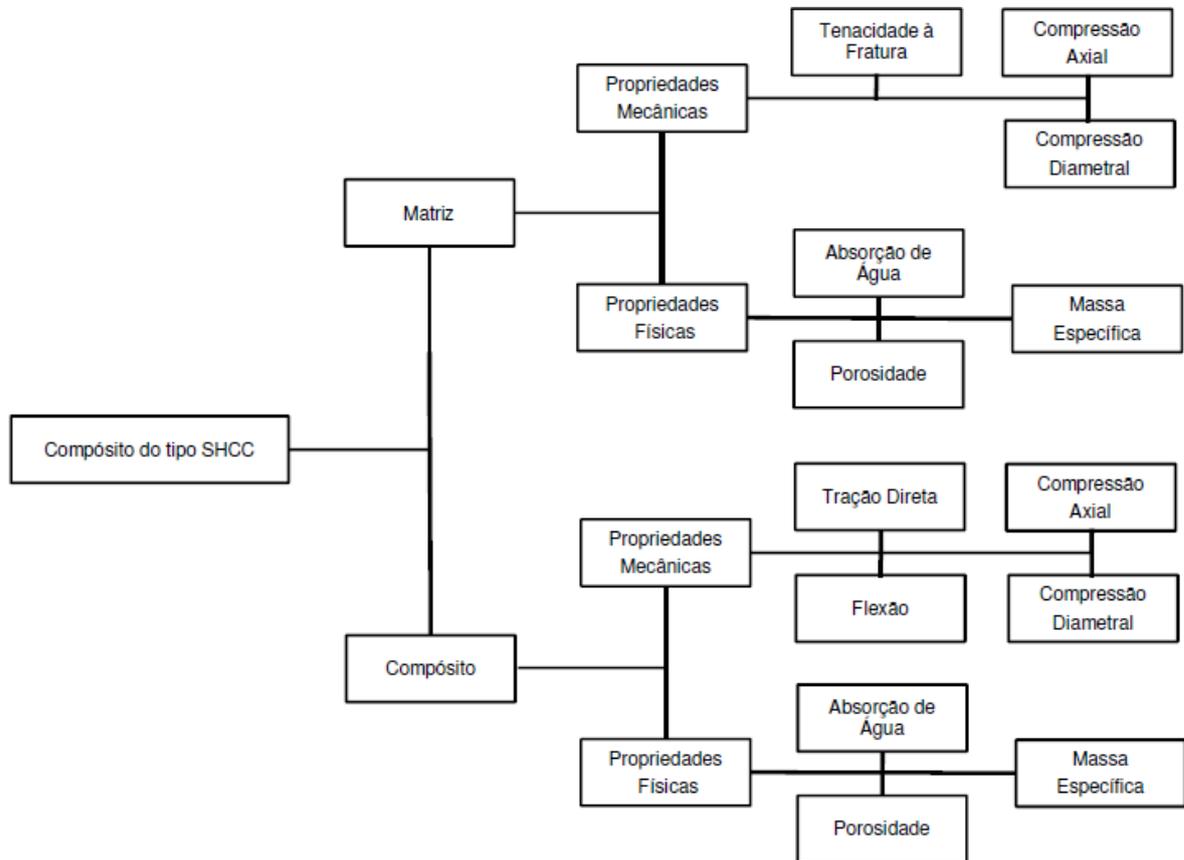


Figura 18 – Fluxograma com as etapas dos estudos nas matrizes e respectivos compósitos (AUTORA, 2023).

2.2 Materiais

2.2.1 Cimento

Foi utilizado o cimento Portland (CP) do tipo CP II-F-40, doado pela empresa Lafarge Holcim. Este cimento tem o nome comercial de ARIF, devido a atender as resistências iniciais de um cimento ARI. Possui a resistência mínima à compressão de 40 MPa aos 28 dias de idade, conforme a norma NBR 7215 (2019). Sua massa

específica é de 3,03 g/cm³, que foi determinada segundo a norma NBR 16605 (2017), e seu índice de finura na peneira de 75 µm é de 0,00 %, e na peneira de 45 µm é de 2,25%, sendo determinado com o auxílio da norma NBR 11579 (2012). Na Tabela 5, é possível verificar as características do cimento, disponibilizadas pelo fabricante.

Tabela 5 – Propriedades do cimento CP II-F-40.

| Ensaio Químico | | | | |
|---------------------------------|---------------|-----------|--------------|---|
| Ensaio | NBR Nº | UN | Média | Especificação Norma NBR 16697/18 |
| PF 950°C ¹ | NM18/12 | % | 9,23 | <=12,50 |
| SO ₃ | NBR14656/01 | % | 3,52 | <=4,50 |
| RI ² | NM22/04 | % | 2,11 | <=7,50 |
| CaO ³ | NM13/13 | % | 1,65 | Não aplicável |
| MgO | NBR14656/01 | % | 1,40 | Não aplicável |
| Resistência à Compressão | | | | |
| 1 dia | NBR7215/19 | MPa | 21,7 | Não aplicável |
| 3 dias | NBR7215/19 | MPa | 30,0 | >=15,0 |
| 7 dias | NBR7215/19 | MPa | 35,1 | >=25,0 |
| 28 dias | NBR7215/19 | MPa | 42,4 | >=40,0 |

2.2.2 Cinza volante

Foram utilizados dois tipos de cinzas volantes (CV), cinza volante residual (CVR) e cinza volante beneficiada (CVB) (Figura 19a e b), fornecidas pela empresa Pozo Fly. Para a sua caracterização, foram determinadas as massas específicas, índices de finura e os índices de desempenho com o cimento Portland aos 28 dias, através das normas NBR 16605 (2017), NBR 12826 (2014) e NBR 5752 (2014), respectivamente.

¹ Ensaio de perda ao fogo após aquecimento a 950°C.

² Determinação da quantidade de resíduo insolúvel.

³ Determinação de óxido de cálcio livre.



Figura 19 – Cinzas volantes (a) beneficiada e (b) residual.

A cinza volante residual possui massa específica de $2,10 \text{ g/cm}^3$, índice de finura na peneira de $75 \mu\text{m}$ de 27,40% e na peneira de $45 \mu\text{m}$ de 43,80% e índice de desempenho com o cimento de 87,71%. Já a cinza volante beneficiada, possui massa específica de $2,42 \text{ g/cm}^3$, índice de finura na peneira de $75 \mu\text{m}$ de 0,50% e na peneira de $45 \mu\text{m}$ de 6,70% e índice de desempenho com o cimento de 109,77%. Na Tabela 6 é possível verificar a composição química das cinzas volantes, que foi determinada por espectrometria de fluorescência de raio X, com o auxílio do equipamento Shimadzu EDX-720.

Tabela 6 – Composição química da cinza volante (VITAL E MAGALHÃES, 2022).

| Componentes da Cinza Volante | Teor (%) |
|-------------------------------------|-----------------|
| Al_2O_3 | 32,24 |
| SiO_2 | 53,64 |
| SO_3 | 1,66 |
| K_2O | 3,48 |
| CaO | 1,97 |
| Fe_2O_3 | 5,48 |
| TiO_2 | 1,33 |

2.2.3 Agregado miúdo

Foi utilizado como agregado miúdo, a areia de britagem que é comumente classificada como resíduo da indústria de britagem de rochas. Este resíduo de britagem é originário de uma rocha gnaisse granítico, possui forma das partículas mais angulosas e lamelares, com grande quantidade de vértices e arestas. Esta areia de britagem foi fornecida pela empresa Ibrata Mineração Ltda, localizada na cidade do Rio de Janeiro, conforme indicado na Figura 20.

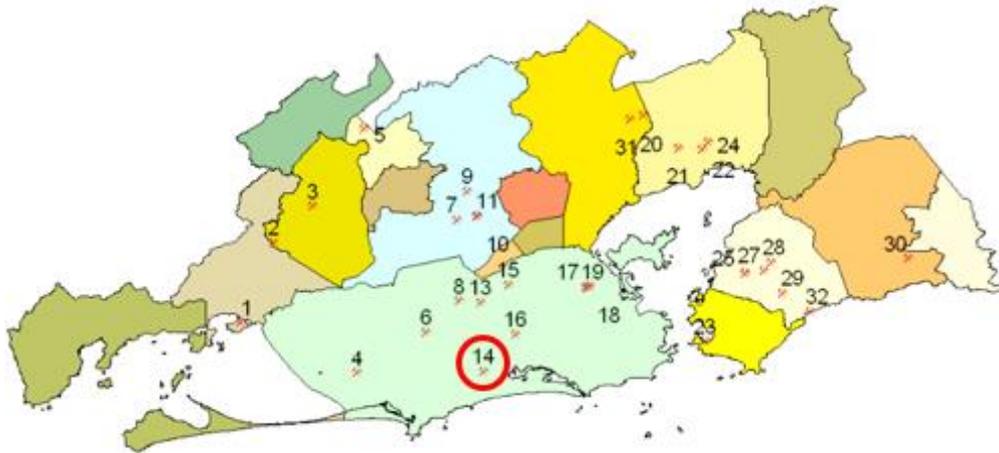


Figura 20 – Mapa da localização das pedreiras na região metropolitana do Rio de Janeiro: nº 14 Empresa Ibrata Mineração Ltda (SILVA, 2005).

Após análise da curva granulométrica da areia de britagem, decidiu-se utilizar quatro amostras de areia com diferentes tamanhos máximos. Em seguida, a areia de britagem foi seca em estufa e peneirada, para assim obter as frações passantes nas peneiras de 2,40 mm (M2.4), 1,20 mm (M1.2), 0,60 mm (M0.6) e 0,30 mm (M0.3) que foram utilizadas nas diferentes misturas.

Além do agregado miúdo proveniente de rocha britada, foi utilizada para análise comparativa, uma areia natural (MR: mistura de referência), comprada em lojas de materiais de construção. Esta areia foi primeiramente seca em estufa e após isto, peneirada. Foi utilizada a areia natural passante na peneira de 0,30 mm (300 μ m). Na Figura 21 é possível verificar as areias utilizadas neste estudo.



Figura 21 – Na ordem da esquerda para a direita: M2.4, M1.2, M0.6, M0.3 e MR.

Na Figura 22, é possível verificar a distribuição granulométrica das areias utilizadas neste estudo, que foi determinada de acordo com a NBR 17054 (2022).

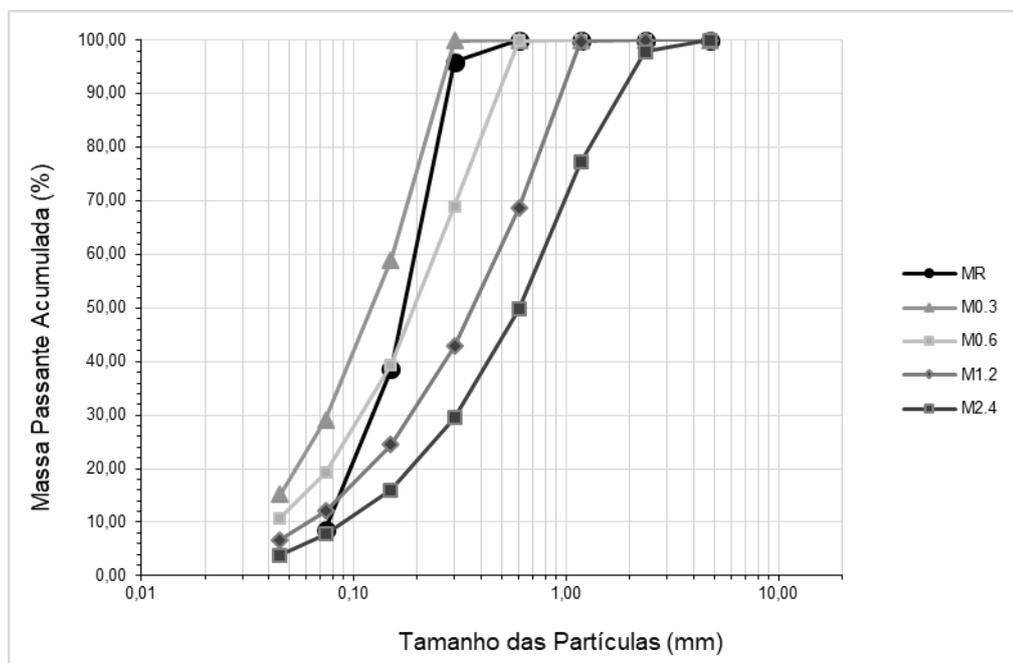


Figura 22 – Curva granulométrica das areias utilizadas no estudo.

Na Tabela 7, é possível verificar a massa específica de cada granulometria da areia resíduo de britagem e da areia natural (MR) utilizada neste estudo. O ensaio de massa específica foi feito seguindo as diretrizes da norma NBR 16916 (2021).

Tabela 7 – Massa específica das areias.

| Areia | Massa Específica (g/cm ³) |
|-------|---------------------------------------|
| M2.4 | 2,59 |
| M1.2 | 2,54 |
| M0.6 | 2,44 |
| M0.3 | 2,53 |
| MR | 2,64 |

2.2.4 Fibra

A fibra utilizada como reforço do compósito objeto deste estudo, foi a fibra de álcool polivinílico, do inglês *polyvinyl alcohol* (PVA), do fabricante japonês Kuraray (ver Figura 23).



Figura 23 – Fibra de PVA utilizada na composição do SHCC.

A fibra possui 12 mm de comprimento e na Tabela 8 é possível verificar suas propriedades físicas e mecânicas, fornecidas pelo fabricante.

Tabela 8 – Propriedades físicas e mecânicas da fibra de PVA.

| Propriedade | Dimensão |
|--------------------------------------|-----------------|
| Comprimento (mm) | 12 |
| Diâmetro (μm) | 40 |
| Razão de aspecto | 300 |
| Densidade (g/cm^3) | 1,31 |
| Módulo de elasticidade (GPa) | 41 |
| Resistência à tração (MPa) | 1560 |
| Alongamento (%) | 6,5 |

2.2.5 Água

A água utilizada na moldagem dos compósitos é proveniente das instalações hidráulicas do Laboratório de Engenharia Civil da UERJ, que por sua vez, é fornecida pela rede municipal de abastecimento de água da cidade do Rio de Janeiro.

2.2.6 Superplastificante

Foi utilizado o superplastificante (SP) Glenium 51 de terceira geração, da fabricante BASF. Possui como base química o éter policarboxílico, com massa específica de $1,10 \text{ g}/\text{cm}^3$ e teor de sólidos de 27%.

Com o objetivo de determinar o ponto de saturação do superplastificante, foi realizado o ensaio de compatibilidade entre o superplastificante e o material cimentício, através do método do funil de Marsh. Esta metodologia consiste em verificar o tempo necessário para uma determinada pasta escoar através do funil de Marshall (Figura 24). Para realizar este ensaio, é feito em média 1,2 litros de pasta e

mede-se o tempo necessário para preencher com 1 litro da mistura, um béquer graduado que fica logo abaixo do funil. Foram feitas duas medições com os tempos de 5 e 10 minutos, que é contabilizado a partir do momento que é adicionado o superplastificante na mistura.



Figura 24 – Funil de Marshall.

A pasta foi feita com uma mistura composta por cimento CII-F-40 e cinza volante residual na proporção de 1:1,2 e a/mc de 0,32. Já o teor de SP na mistura, vai sendo modificado para mais ou para menos em intervalos de variação de 0,20%, e assim, o tempo de escoamento também é alterado. Deste modo, consegue-se fazer a leitura de diversos pontos para a análise que foi feita através da Figura 25, e assim foi identificado o ponto de saturação do SP para a mistura em questão. É importante ressaltar que, esta variação da fluidez da pasta acontece devido a função de dispersão das partículas e defloculação do superplastificante.

O ensaio é interrompido a partir do momento que há um aumento ou uma certa estabilidade no tempo de escoamento da pasta. Assim, foi identificado que o ponto de saturação deste superplastificante na mistura com cinza volante residual, é de 1,20% (teor total do SP), equivalente a um teor de SP de 0,32% em relação ao teor de sólidos

do superplastificante. Este ensaio foi realizado com base na norma NBR 7681-2 (2013).

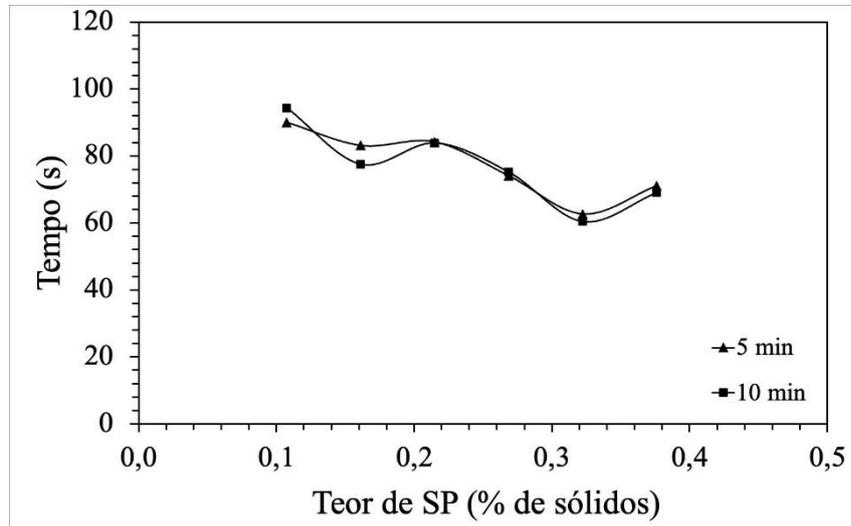


Figura 25 – Gráfico do tempo de escoamento x teor de superplastificante.

2.3 Moldagem da Matriz

Foram fabricadas 10 misturas utilizando dois tipos de cinzas volantes: cinza volante residual (CVR) e cinza volante beneficiada (CVB). Para cada tipo de cinza, foram confeccionadas cinco misturas distintas, com variações no tipo e tamanho do agregado miúdo. Um dos agregados consistiu em areia natural, compondo a mistura de referência (MR), enquanto as outras misturas foram compostas por areia proveniente do resíduo de britagem, com quatro granulometrias diferentes: passante nas peneiras de 2,40 mm (M2.4), 1,20 mm (M1.2), 0,60 mm (M0.6) e 0,30 mm (M0.3).

Para facilitar a identificação das misturas quanto ao tipo de areia e de cinza volante utilizada, adotou-se uma nomenclatura específica. Primeiro, identifica-se a areia e, em seguida, a cinza volante usada na mistura. Por exemplo, uma mistura com areia natural e cinza volante residual será denominada MR-CVR.

Para iniciar a moldagem da matriz dos compósitos, primeiramente foi feita a separação e pesagem dos materiais pertencentes a cada mistura. Na Tabela 9, está exposta a quantidade de cada material utilizado nas misturas, em kg/m^3 . É importante

ressaltar que, para cada tipo de cinza volante foi desenvolvido um traço, onde a única mudança é a proporção de SP (teor total), medido em função do teor de material cimentício (cimento + cinza volante). Isto ocorre devido a mudança do tipo de cinza volante afetar a trabalhabilidade da mistura. Vale observar que a fibra não é um componente da mistura da matriz.

Tabela 9 – Quantidades dos materiais utilizados na matriz do compósito (kg/m³).

| Mistura | | C ¹ | CV ² | Areia | Água | SP ³ |
|---------------------------|------|----------------|-----------------|--------|--------|-----------------|
| Cinza Volante Residual | MR | 530,94 | 637,12 | 420,50 | 360,62 | 2,02 |
| | M0.3 | 528,64 | 634,37 | 418,69 | 358,83 | 2,33 |
| | M0.6 | 524,46 | 629,35 | 415,37 | 356,84 | 1,15 |
| | M1.2 | 527,97 | 633,56 | 418,15 | 360,08 | 0,00 |
| | M2.4 | 529,64 | 635,57 | 419,47 | 361,21 | 0,00 |
| Cinza Volante Beneficiada | MR | 553,13 | 663,75 | 438,08 | 374,83 | 3,29 |
| | M0.3 | 550,64 | 660,77 | 436,11 | 372,88 | 3,63 |
| | M0.6 | 546,10 | 655,32 | 432,51 | 370,24 | 3,00 |
| | M1.2 | 549,91 | 659,89 | 435,53 | 374,15 | 1,21 |
| | M2.4 | 551,72 | 662,06 | 436,96 | 375,38 | 1,21 |

¹C: Cimento.

²CV: Cinza volante.

³SP: Superplastificante.

As misturas da matriz do compósito foram moldadas utilizando-se uma argamassadeira com capacidade para 20 litros (Figura 26). Após a separação e pesagem dos ingredientes da matriz, os materiais secos (cimento, cinza volante e areia) foram previamente misturados com o objetivo de obter uma boa homogeneidade. Depois disto, metade desta mistura foi colocada na argamassadeira e junto foi adicionado aproximadamente 60% da água, e assim foi feita uma mistura inicial. Ao observar que a mistura de cimento, cinza volante e areia estava devidamente úmida (tempo aproximado de 2 min), o aditivo superplastificante foi adicionado quando necessário. Foi aguardado no mínimo 3 minutos da mistura na argamassadeira em velocidade média, para a correta ativação do SP na mistura.



Figura 26 – Argamassadeira utilizada.

Em seguida, o restante do material seco previamente homogeneizado e a água, foram sendo adicionados aos poucos até a sua homogeneização total, não ultrapassando o tempo total de 12 minutos. Moldaram-se corpos de prova cilíndricos para os ensaios de compressão axial, compressão diametral, massa específica, porosidade e absorção de água. Também moldaram-se corpos de prova para ensaio de tenacidade à fratura. Antes de iniciar a moldagem, passou-se óleo desmoldante em todas as formas com o objetivo de facilitar a desmoldagem.

A moldagem dos corpos de prova foi feita imediatamente após o preparo da mistura, onde foi colocada a mistura na forma com o auxílio de espátula metálica, em quatro camadas de altura aproximadamente iguais, com cada camada recebendo 30 golpes uniformes e homogeneamente distribuídos com um soquete metálico. Após o adensamento da última camada, foi feito o rasamento dos corpos de prova com o auxílio de uma espátula, nivelando a sua superfície (Figura 27b).

As formas dos corpos de prova de tenacidade à fratura foram feitas de madeira com revestimento para não absorver a água da mistura. Foram feitos prismas retangulares entalhados, medindo 40 x 80 x 400 mm. O entalhe nos prismas retangulares foi feito no ato da moldagem com o auxílio de uma placa de acrílico fixada a forma. Este pré-entalhe foi feito na superfície inferior da viga, no meio do vão, com profundidade de 24 mm (razão de 0,3 a altura da viga), conforme Figura 27a.

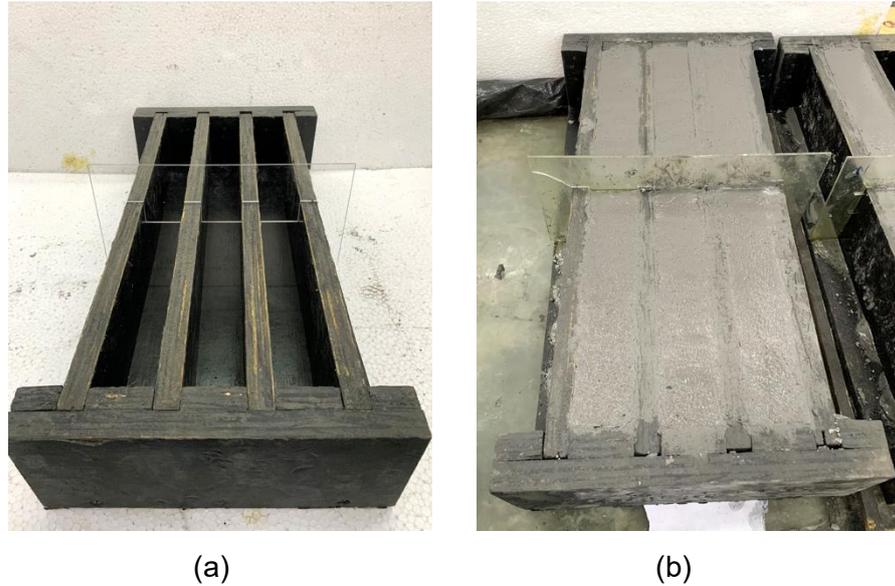


Figura 27 – (a) Forma e (b) moldagem do corpo de prova de tenacidade à fratura da matriz.

Após a moldagem (ver Figura 28a), os corpos de prova foram cobertos com lona plástica úmida, com o objetivo de impedir a perda de água para o meio externo, por 24 horas. Depois deste período, os corpos de prova foram desmoldados (ver Figura 28b) e levados para cura em tanques com água na temperatura de 26°C, onde ficaram até a idade de realização dos ensaios.

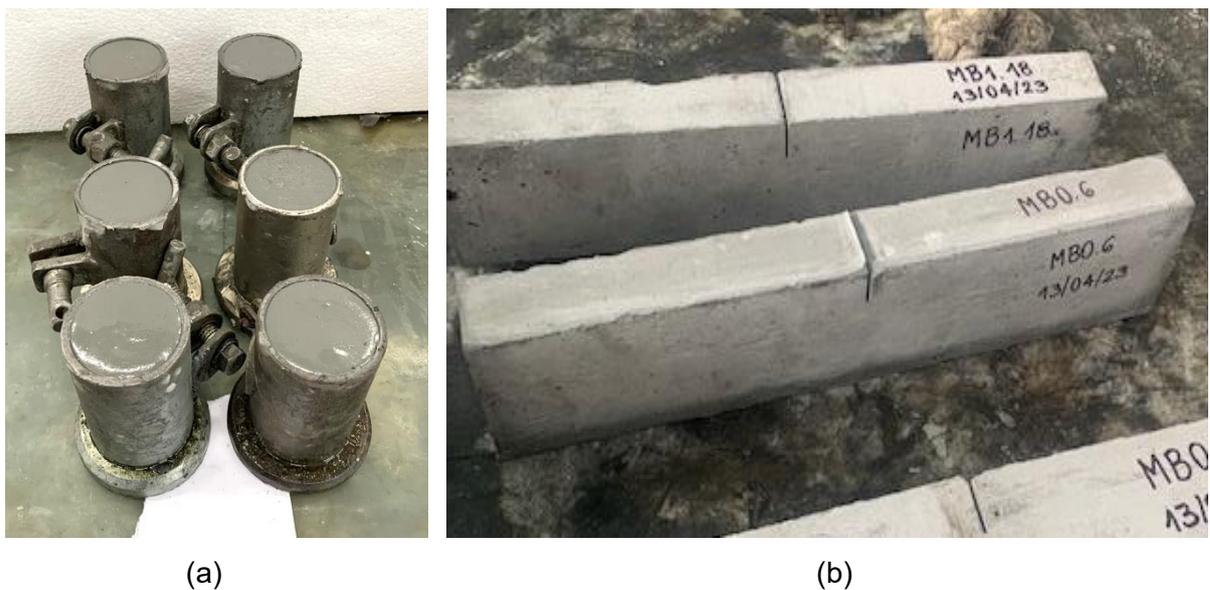


Figura 28 – (a) Moldagem e (b) desmoldagem de corpos de prova da matriz do compósito.

2.4 Moldagem do Compósito

Na moldagem dos compósitos também foram feitas misturas utilizando quatro granulometrias da areia resíduo de britagem e a areia natural, assim como o uso das cinzas volantes residual e beneficiada. Na Tabela 10 está exposto os traços utilizados nas misturas em proporção. Já na Tabela 11, é possível verificar a quantidade de cada material utilizado na mistura. A distinção entre a proporção da matriz e do compósito de SHCC reside na quantidade de superplastificante empregada nas misturas. Na matriz, algumas misturas não necessitaram do aditivo superplastificante, enquanto no compósito, esse material é essencial. É importante observar que a fibra é um componente da mistura do compósito.

Tabela 10 – Proporção dos materiais utilizados nas misturas.

| Mistura | | CV ¹ /C ² | Areia/(CV+C) | Água/(CV+C) | SP ³ /(CV + C) (%) | PVA ⁴ (%) |
|---------------------------|------|---------------------------------|--------------|-------------|-------------------------------|----------------------|
| Cinza Volante Residual | MR | 1,2 | 0,36 | 0,31 | 0,80 | 2,00 |
| | M0.3 | 1,2 | 0,36 | 0,31 | 0,80 | 2,00 |
| | M0.6 | 1,2 | 0,36 | 0,31 | 0,43 | 2,00 |
| | M1.2 | 1,2 | 0,36 | 0,31 | 0,40 | 2,00 |
| | M2.4 | 1,2 | 0,36 | 0,31 | 0,50 | 2,00 |
| Cinza Volante Beneficiada | MR | 1,2 | 0,36 | 0,31 | 0,50 | 2,00 |
| | M0.3 | 1,2 | 0,36 | 0,31 | 0,50 | 2,00 |
| | M0.6 | 1,2 | 0,36 | 0,31 | 0,45 | 2,00 |
| | M1.2 | 1,2 | 0,36 | 0,31 | 0,42 | 2,00 |
| | M2.4 | 1,2 | 0,36 | 0,31 | 0,40 | 2,00 |

¹CV: Cinza volante.

²C: Cimento.

³SP: Superplastificante.

⁴PVA: Fibra de álcool polivinílico.

Tabela 11 – Quantidades dos materiais utilizados nas misturas dos compósitos, em kg/m³.

| Mistura | | C ¹ | CV ² | Areia | Água | SP ³ | PVA ⁴ |
|---------------------------|------|----------------|-----------------|--------|--------|-----------------|------------------|
| Cinza Volante Residual | MR | 530,94 | 637,12 | 420,50 | 355,27 | 9,34 | 26,00 |
| | M0.3 | 528,64 | 634,37 | 418,69 | 353,73 | 9,30 | 26,00 |
| | M0.6 | 524,46 | 629,35 | 415,37 | 354,05 | 4,96 | 26,00 |
| | M1.2 | 527,97 | 633,56 | 418,15 | 356,68 | 4,65 | 26,00 |
| | M2.4 | 529,64 | 635,57 | 419,47 | 356,95 | 5,83 | 26,00 |
| Cinza Volante Beneficiada | MR | 553,13 | 663,75 | 438,08 | 372,78 | 6,08 | 26,00 |
| | M0.3 | 550,64 | 660,77 | 436,11 | 371,10 | 6,06 | 26,00 |
| | M0.6 | 546,10 | 655,32 | 432,51 | 368,49 | 5,41 | 26,00 |
| | M1.2 | 549,91 | 659,89 | 435,53 | 371,32 | 5,08 | 26,00 |
| | M2.4 | 551,72 | 662,06 | 436,96 | 372,72 | 4,86 | 26,00 |

¹C: Cimento.

²CV: Cinza volante.

³SP: Superplastificante.

⁴PVA: Fibra de álcool polivinílico.

As misturas dos compósitos foram moldadas conforme o procedimento de moldagem da matriz descrito no item 2.3, inserindo-se as fibras ao final da mistura. As fibras foram adicionadas lentamente logo após a homogeneização da matriz. O objetivo de inseri-las lentamente era evitar a formação de grumos, que pode ocasionar uma dispersão não homogênea das fibras. O tempo de adição das fibras na mistura foi de aproximadamente 2 minutos. Depois da adição das fibras, misturou-se por mais 2 minutos para se obter uma melhor distribuição das fibras na mistura. Caso fosse observada a existência de grumos, misturava-se por mais tempo, não ultrapassando o tempo total de 12 minutos. Na Figura 29, é possível verificar a mistura do compósito na argamassadeira.

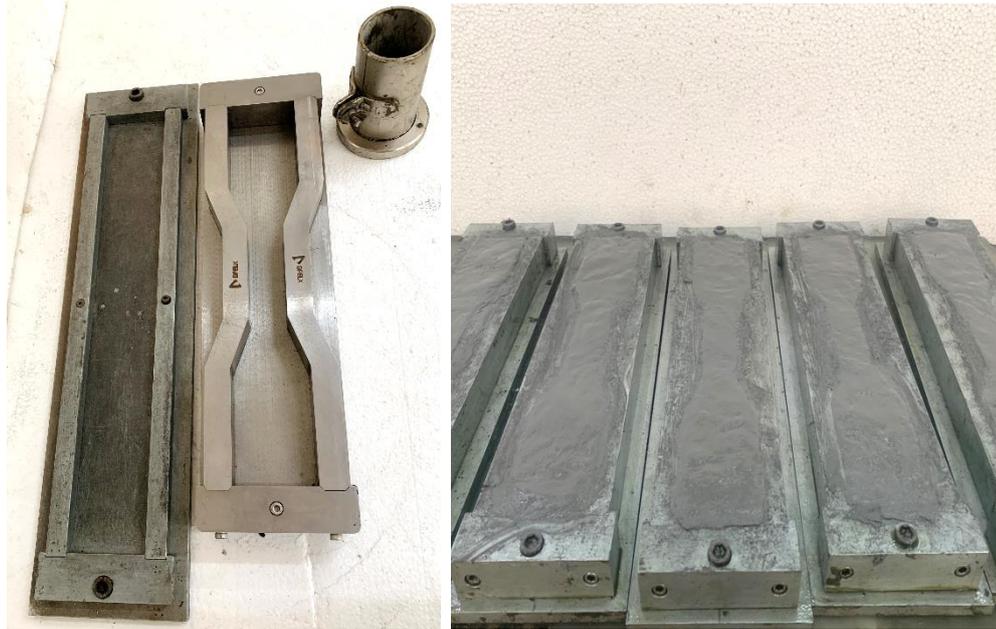


(a)

(b)

Figura 29 – (a) Mistura dos ingredientes na argamassadeira e (b) resultado final da mistura de SHCC.

Moldaram-se corpos de prova cilíndricos (Figura 30a), para os ensaios de compressão axial, compressão diametral, massa específica, porosidade e absorção de água. Também moldaram-se corpos de prova prismáticos para os ensaios de flexão (ver Figura 30a), e corpos de prova com um formato conhecido como osso de cachorro, do inglês *dogbone* ou halter (Figura 30a e b), para os ensaios de tração direta.



(a)

(b)

Figura 30 – (a) Formas de flexão, tração e compressão e (b) moldagem de corpo de prova de tração.

Após a moldagem (Figura 31a), os corpos de prova foram cobertos com lona plástica úmida, com o objetivo de impedir a perda de água para o meio externo, por 24 horas. Depois deste período, os corpos de prova foram desmoldados (Figura 31b) e levados para cura em tanques com água na temperatura de 26°C (Figura 31c), onde ficaram até a idade de realização dos ensaios.



(a)

(b)

(c)

Figura 31 – (a) Moldagem, (b) desmoldagem e (c) corpos de prova no tanque com água.

2.5 Ensaio Experimentais na Matriz e no Compósito

2.5.1 Propriedades no estado fresco

Após a finalização das devidas misturas, e antes de iniciar a moldagem, foram realizados ensaios de consistência e massa específica para verificar as propriedades da matriz e do compósito no estado fresco.

2.5.1.1 Consistência

O ensaio do índice de consistência, popularmente conhecido como ensaio de espalhamento, determina o índice de consistência da mistura a ser produzida. Ele avalia a trabalhabilidade e/ou fluidez da matriz e do compósito no estado fresco, com base na norma NBR 13276 (2016). Os materiais utilizados para a execução deste ensaio foram: mesa para índice de consistência, no inglês *flow table*, molde tronco cônico, soquete metálico, régua metálica e/ou paquímetro para melhor precisão ao aferir.

Antes de iniciar a execução deste ensaio, foi feita a limpeza do tampo da mesa e posteriormente foi aplicado óleo desmoldante na mesma. Foi feita também a limpeza do molde tronco cônico e colocou-se ele centralizado na mesa. Assim, logo após a preparação da mistura, segurou-se o molde com firmeza e foi adicionada três camadas da mistura, com alturas aproximadamente iguais. Em cada camada foi aplicado respectivamente, quinze, dez e cinco golpes com o soquete, distribuído uniformemente.



Figura 32 – Mesa com o molde tronco cônico.

Após isto, foi feito o rasamento da mistura, retirando qualquer excesso, e a base foi limpa (ver Figura 32). Posteriormente, foi retirado o molde de tronco cônico verticalmente. Depois disto, a manivela da mesa foi acionada de forma manual, fazendo com que a mesa subisse e descesse trinta vezes em 30 segundos, uniformemente. Imediatamente após o termino desta etapa, foram aferidas três medições do diâmetro do espalhamento e feita a sua média (ver Figura 33a, b e c).



Figura 33 – (a) Ensaio de consistência do compósito do tipo SHCC, (b) medindo o espalhamento do SHCC e (c) medindo o espalhamento da matriz.

2.5.1.2 Massa específica

Para determinação da massa específica da matriz e do compósito no estado fresco, foi utilizada a norma NBR 13278 (2005). Para a execução do método, foi necessário o uso de balança, espátula, um recipiente cilíndrico metálico com 400 cm³, devidamente calibrado e outros utensílios de laboratório.

Imediatamente após o preparo da mistura, a mesma foi adicionada no recipiente metálico em três camadas de altura aproximadamente iguais. Em cada camada foram aplicados 20 golpes com auxílio do soquete. Após isto, foram efetuadas três quedas do recipiente metálico sobre uma mesa. Esta queda possui uma altura aproximada de 3 cm e tem como objetivo retirar os vazios entre a mistura e a parede do recipiente metálico. Para concluir o procedimento, foi feito o rasamento com o uso da espátula, a limpeza e pesagem (ver Figura 34). Para determinação da massa específica foi utilizada a Equação 1.

$$dm = \frac{mc - mv}{vr} \times 1000 \quad (1)$$

Onde,

dm é a massa específica aparente da argamassa (kg/m³);

mc é a massa do recipiente cilíndrico contendo a argamassa de ensaio (g);

mv é a massa do recipiente cilíndrico vazio (g);

vr é o volume do recipiente cilíndrico (cm³).



Figura 34 – Pesagem da mistura fresca no ensaio de massa específica.

2.5.2 Propriedades no estado endurecido

Aos 28 dias de idade dos corpos de prova, foram realizados os ensaios de massa específica, índice de vazios, absorção de água, compressão axial e compressão diametral nas matrizes e nos compósitos. Os ensaios de flexão e tração direta foram feitos somente nos compósitos. Já o ensaio de tenacidade à fratura foi feito somente nas matrizes dos compósitos.

2.5.2.1 Massa específica, porosidade e absorção de água

Os ensaios de massa específica, porosidade (índice de vazios) e absorção de água, foram realizados conforme a norma NBR 9778 (2005). Foram utilizados três corpos de prova cilíndricos com as dimensões de 5 x 10 cm (diâmetro x altura), de cada mistura.

2.5.2.2 Resistência à compressão axial

Para o ensaio de compressão axial foram utilizados no mínimo três corpos de prova cilíndricos medindo 5 x 10 cm (diâmetro x altura) de cada mistura. Para a realização dos ensaios, foi utilizada uma máquina servo controlada da fabricante INSTRON, com capacidade de 100 KN, e velocidade de 0,3 mm/min (ver Figura 35a). O ensaio também foi feito com o auxílio de dois extensômetros, posicionados na área central dos corpos de prova, para medir os deslocamentos axiais (Figura 35b). Algumas amostras ultrapassaram a capacidade máxima desta máquina e seu ensaio foi realizado em uma prensa da fabricante Forney com capacidade de 100 toneladas.

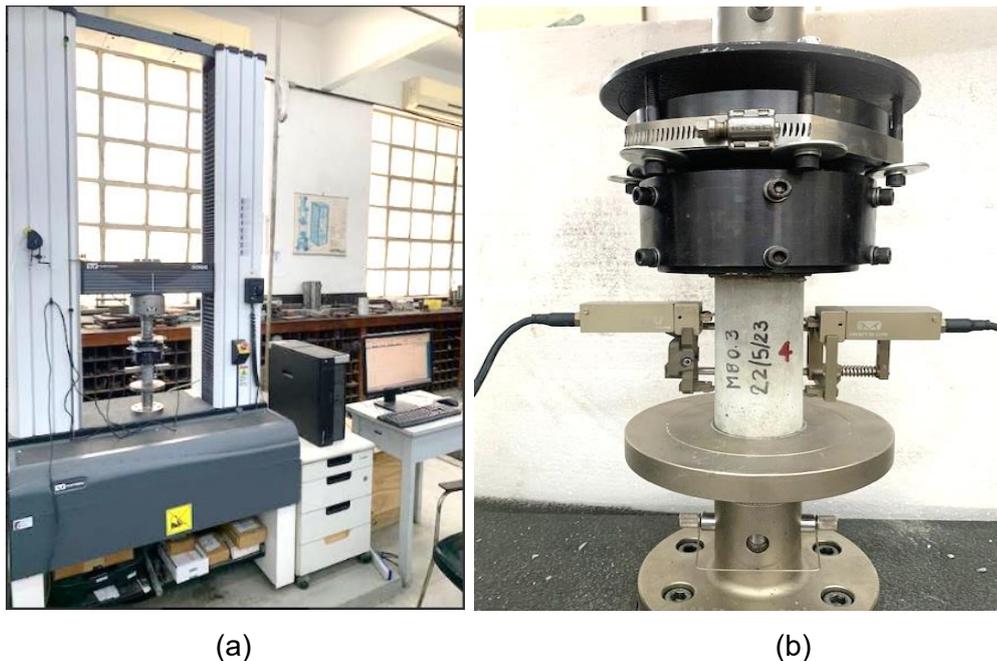


Figura 35 – (a) Máquina servo controlada utilizada no estudo e (b) configuração do ensaio de compressão axial.

Para a correta execução do ensaio e consequente obtenção de resultados satisfatórios, foi necessário preparar as amostras. Para isto, primeiramente foi feito o nivelamento dos corpos de prova cilíndricos através da técnica de capeamento (ver Figura 36), que consiste em uma aplicação de uma camada fina de uma pasta de cimento com baixo teor água/cimento, sobre a face superior do corpo de prova. Essa

camada é aplicada para garantir que o corpo de prova tenha uma superfície plana e sem irregularidades que possam afetar o resultados dos ensaios. A espessura da camada de capeamento, não deve exceder 3 mm, conforme a norma NBR 5738 (2015).



Figura 36 – Corpos de prova capeados.

No dia do ensaio, as amostras foram retiradas da câmara úmida, lavadas e colocadas para secar em temperatura ambiente. Após a realização do ensaio, a resistência à compressão foi determinada com o uso da Equação 2. Através deste ensaio, também foi possível determinar o módulo de elasticidade. O cálculo do módulo de elasticidade foi feito através da inclinação da reta tangente no gráfico de tensão deformação da resistência à compressão, até atingir 30% da tensão máxima.

$$f_c = \frac{4F}{\pi d^2} \quad (2)$$

Onde,

f_c é a resistência à compressão (MPa);

F é a força máxima alcançada (N);

d é o diâmetro do corpo de prova (mm).

2.5.2.3 Compressão diametral

Este ensaio é determinado pela norma NBR 7222 (2011), e denominado como ensaio de tração por compressão diametral. O ensaio foi feito em três corpos de prova cilíndricos de 5 x 10 cm (diâmetro x altura) da cada mistura. Primeiramente, foi traçada uma linha reta diametral em cada extremidade do corpo de prova cilíndrico, de modo que as duas linhas resultantes ficaram contidas no mesmo plano axial. Após isto, o corpo de prova foi colocado de forma horizontalmente na máquina de ensaio, com o eixo do corpo de prova cilíndrico alinhado perpendicularmente à direção de aplicação da carga, conforme Figura 37.



Figura 37 – Ensaio de compressão diametral.

Entre os pratos da máquina e os corpos de prova ensaiados, foram colocadas duas tiras de chapa dura de madeira, também conhecidas como cunhas, para proporcionar uma distribuição mais uniforme da carga durante a aplicação da força. Isso ajuda a minimizar o risco de falhas prematuras nas extremidades do corpo de prova e permite que a carga seja aplicada de forma mais equitativa ao longo da altura do cilindro.

Este ensaio também foi realizado com uma máquina servo controlada da fabricante INSTRON, com capacidade de 100 KN e velocidade de 0,05 MPa/s. A carga foi aplicada continuamente até a ruptura do corpo de prova. Os cálculos foram feitos através da Equação 3.

$$f_{ct,sp} = \frac{2F}{\pi dh} \quad (3)$$

Onde,

$f_{ct,sp}$ é a resistência à tração por compressão diametral (MPa);

F é a força máxima obtida no ensaio (N);

d é o diâmetro do corpo de prova (mm);

h é a altura do corpo de prova (mm).

2.5.2.4 Tenacidade à fratura

O ensaio de tenacidade à fratura foi feito na matriz dos compósitos. Para a sua execução, foram utilizados quatro prismas retangulares pré-entalhados medindo 40 × 80 × 400 mm de cada mistura. Os ensaios foram realizados baseados na norma ASTM E399 (2013), usando uma configuração de teste de flexão de três pontos.

Para isto, foi utilizada uma máquina servo controlada da fabricante INSTRON, com capacidade de 100 KN e taxa de carregamento de 0,5 mm/min. O comprimento do vão do apoio inferior da viga foi de 320 mm. A configuração do ensaio é mostrada na Figura 38.



Figura 38 – Configuração do ensaio de tenacidade à fratura da matriz do SHCC.

De acordo com Xu e Reinhardt (1999), a tenacidade à fratura da matriz pode ser calculada através das Equações 4 e 5.

$$K_m = \left(\frac{1,5 \left(F + \frac{mg}{2} \right) x S x a^{0,5}}{th^2} \right) f(a) \quad (4)$$

$$f(a) = \frac{(1,99 - a(1-a)(2,15 - 3,99a + 2,7a^2))}{(1 + 2a)(1 - a)^{3/2}} \quad (5)$$

Onde,

K_m é a tenacidade à fratura ($\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$);

F é a carga máxima registrada no ensaio (N);

m é a massa do corpo de prova (kg);

g é a aceleração da gravidade (m/s^2);

S é o vão de aplicação da carga no corpo de prova (m);

t é a largura do corpo de prova (m);

h é a altura do corpo de prova (m);

ao é a profundidade do entalhe no corpo de prova (m);

a é a profundidade do entalhe (ao) dividido pela altura do corpo de prova (h).

Segundo Li (1993), a energia de fratura da matriz pode ser calculada conforme a Equação 6.

$$J_{tip} = \frac{Km^2}{E} \quad (6)$$

Sendo,

J_{tip} é a energia de fratura da matriz (J/m²);

E é o módulo de elasticidade (MPa).

2.5.2.5 Flexão

Foi feito o ensaio de flexão em quatro pontos para determinar a resistência e a deformabilidade dos compósitos, quando submetidos a cargas em dois pontos na parte central. O vão de aplicação de carga foi de 300 mm. Para este ensaio, foram utilizados cinco corpos de prova retangulares de cada mistura, com dimensões de 15 x 60 x 400 mm.

Neste ensaio, a carga é aplicada de forma gradual e controlada até a falha do corpo de prova ou até atingir um ponto pré-determinado de deformação. Para isto, foi utilizada uma máquina servo controlada da fabricante INSTRON, com capacidade de 100 KN e velocidade de 0,5 mm/min, e os deslocamentos foram medidos por um deflectômetro localizado no meio do vão de aplicação da carga, de acordo com a Figura 39. Durante os ensaios, são registrados os valores da carga aplicada e a deformação do corpo de prova.



(a)

(b)

Figura 39 – (a) Ensaio de flexão durante carregamento e (b) deflectômetro utilizado.

Com este ensaio, foram obtidos os valores da tensão e deslocamento na primeira fissura e tensão e deslocamentos máximos. Os cálculos das tensões equivalentes de flexão foram feitos através da Equação 7.

$$f_{ct,f} = \frac{F \cdot l}{b \cdot h_m^2} \quad (7)$$

Onde,

$f_{ct,f}$ é a resistência à tração na flexão (MPa);

F é a força máxima registrada na máquina de ensaio (N);

b é a largura média do corpo de prova (mm);

l é a dimensão do vão entre apoios (mm);

h_m é a altura média do corpo de prova (mm).

2.5.2.6 Tração direta

Para a realização deste ensaio foram utilizados cinco corpos de prova de cada mistura do compósito estudado, cujas medidas são conforme a Figura 40. Os corpos de prova foram ensaiados em uma máquina servo controlada da fabricante INSTRON

(ver Figura 35a), com capacidade de 100 KN e velocidade de 0,1 mm/min. Os deslocamentos foram medidos com o auxílio de dois extensômetros posicionados na área central do corpo de prova.

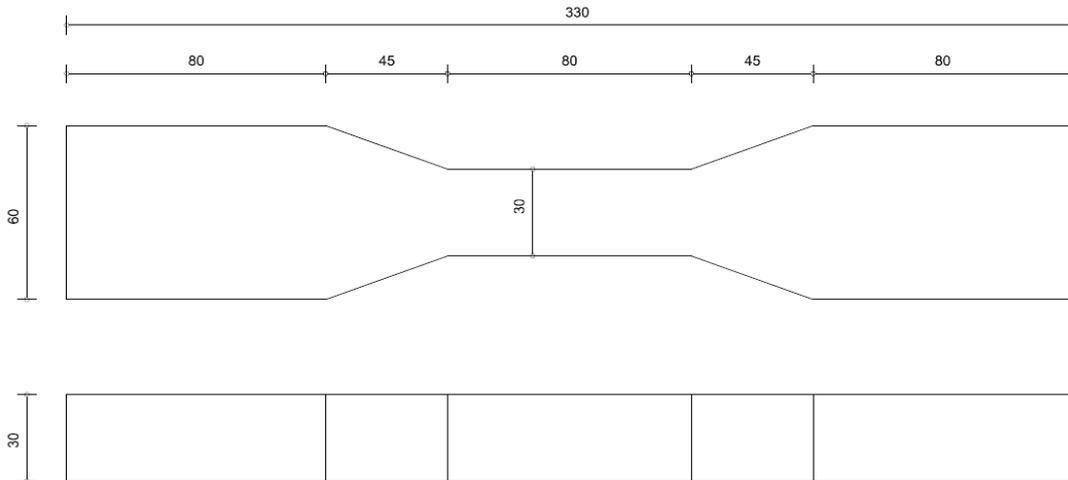


Figura 40 – Medidas do corpo de prova utilizado no ensaio de tração em mm (sem escala).

Diversos estudos relatam a dificuldade em realizar este ensaio, devido à complexidade em desenvolver um dispositivo que promova corretamente o alinhamento do corpo de prova com o eixo de aplicação de carga, de forma que não gere tensões de flexão ou de torção, ocasionando o rompimento do corpo de prova de forma prematura ou fora da região esperada. Então, para este estudo, foi desenvolvido um dispositivo baseado na norma japonesa JSCE (2008). Na Figura 41, é possível verificar este dispositivo desenvolvido e o corpo de prova de tração direta com o extensômetro.



Figura 41 – Dispositivo e corpo de prova para ensaio de tração com extensômetro.

2.6 Resultados e Discussões

2.6.1 Propriedades da matriz

2.6.1.1 Propriedades no estado fresco

As propriedades no estado fresco das matrizes dos compósitos podem ser observadas na Tabela 12, onde constam os resultados do índice de consistência e da massa específica. Ressalta-se que são apresentados os valores médios e entre parênteses encontram-se os desvios padrão de cada mistura.

Tabela 12 – Propriedades no estado fresco das misturas da matriz.

| Mistura | | Índice de Consistência (mm) | Massa Específica (g/cm ³) |
|---------------------------|------|-----------------------------|---------------------------------------|
| Cinza Volante Residual | MR | 219,50 (0,33) | 1,87 |
| | M0.3 | 225,00 (0,25) | 1,87 |
| | M0.6 | 235,00 (0,24) | 1,85 |
| | M1.2 | 237,00 (0,34) | 1,88 |
| | M2.4 | 240,00 (0,24) | 1,90 |
| Cinza Volante Beneficiada | MR | 206,50 (0,21) | 1,96 |
| | M0.3 | 226,50 (0,34) | 1,97 |
| | M0.6 | 238,00 (0,26) | 1,97 |
| | M1.2 | 201,00 (0,23) | 1,98 |
| | M2.4 | 217,00 (0,26) | 2,00 |

Através do desvio padrão é possível verificar que não houve grandes variações no diâmetro do espalhamento das misturas da matriz, indicando que as misturas possuem uma consistência homogênea em toda a sua extensão. E também é possível observar que todas as misturas da matriz obtiveram uma consistência plástica variando entre 201 a 240 mm. Foi verificado visualmente uma maior compacidade nas misturas com cinza volante beneficiada.

Analisando o índice de consistência da areia natural em relação aos de areia de britagem, é possível que a esfericidade da cinza volante tenha um impacto preponderante sobre o formato dos grãos de areia natural e de britagem, gerando índice de consistência maior das misturas com areia de britagem em relação a areia natural. Isso pode ocorrer devido a partículas esféricas melhorarem a trabalhabilidade, reduzirem a viscosidade da mistura, permitirem um empacotamento mais eficiente e agirem como lubrificantes entre os grãos de areia, resultando em uma mistura mais fluida e coesa.

Ao analisar a variação do tamanho do grão da areia com cinza volante residual, foi possível observar um aumento da fluidez conforme o aumento dos grãos da areia. Isso ocorreu devido a partículas mais grossa ter menor área superficial em comparação com partículas finas, o que também significa que a demanda por

superplastificante pode ser menor para revestir eficientemente as partículas e proporcionar a mesma fluidez. E foi observado exatamente isto, quanto maior a granulometria, menor o teor (ou até mesmo a não necessidade) de superplastificante foi necessário para alcançar uma determinada trabalhabilidade.

Betioli *et al.* (2020) ao estudar os efeitos da composição granulométrica e da área específica de resíduos de polimento de porcelanato em argamassas autoadensáveis, também observou que devido ao resíduo ter menor área superficial e partículas mais grossas, necessita de menor teor de superplastificante. Carvalho (2015), disse que o uso de finos com maior área superficial específica resulta em maior adsorção de água, reduzindo a fluidez da mistura.

Já ao analisar este mesmo item com a cinza volante beneficiada, não foi possível observar o mesmo comportamento. Isso provavelmente se deve em decorrência da cinza volante moída ter partículas mais finas, maior superfície específica e maior atividade pozolânica, podendo afetar as propriedades reológicas da argamassa, fazendo com que o seu índice de consistência tenha uma variação não uniforme. Mas em termos gerais, é possível observar através da fluidez, que misturas com a cinza volante beneficiada tem maior compacidade que misturas com cinza volante residual.

De acordo com Andrade (1991), partículas menores de cinza correspondem a uma maior superfície específica, que conduz a um maior número de pontos de contato entre os elementos reativos da mistura, apresentando maior atividade pozolânica. Neville (2015) diz que a incorporação de uma cinza volante mais fina tende a aumentar a quantidade de aglomerante da mistura, mas também devido a partículas finas se posicionarem nos volumes vazios da argamassa ou concreto, aumenta a compacidade.

Em relação a massa específica no estado fresco, foi observado um aumento conforme o tipo de cinza volante utilizada. As misturas com cinza volante beneficiada obtiveram maiores valores do que as misturas com cinza volante residual, provavelmente devido à maior massa específica da cinza volante beneficiada em comparação com a residual. Quanto aos diferentes tamanhos de grãos de areia de britagem, os valores de massa específica foram similares, com variação desprezível.

2.6.1.2 Propriedades no estado endurecido

2.6.1.2.1 Propriedades físicas

As propriedades físicas no estado endurecido das matrizes dos compósitos constam na Tabela 13, onde é possível verificar os valores médios da porosidade, absorção de água e massa específica, e entre parênteses têm-se os respectivos desvios padrão de cada mistura.

Tabela 13 – Valores das propriedades no estado endurecido das misturas da matriz.

| Mistura | | Porosidade (%) | Absorção (%) | Massa Específica (g/cm ³) |
|---------------------------|------|----------------|--------------|---------------------------------------|
| Cinza Volante Residual | MR | 26,58 (0,19) | 15,65 (0,13) | 1,70 (0,00) |
| | M0.3 | 27,76 (0,77) | 16,91 (0,62) | 1,64 (0,01) |
| | M0.6 | 27,21 (0,13) | 16,11 (0,03) | 1,69 (0,01) |
| | M1.2 | 27,36 (0,14) | 16,55 (0,59) | 1,65 (0,05) |
| | M2.4 | 27,96 (0,10) | 16,83 (0,35) | 1,66 (0,02) |
| Cinza Volante Beneficiada | MR | 15,42 (0,28) | 8,07 (0,31) | 1,87 (0,01) |
| | M0.3 | 17,08 (0,27) | 9,38 (0,22) | 1,82 (0,01) |
| | M0.6 | 14,40 (0,20) | 7,68 (0,14) | 1,86 (0,00) |
| | M1.2 | 16,24 (0,53) | 8,65 (0,27) | 1,86 (0,00) |
| | M2.4 | 16,11 (0,00) | 8,48 (0,00) | 1,85 (0,00) |

Com relação a massa específica no estado endurecido, foi observado um aumento quando utilizada cinza volante mais fina, como citado anteriormente, provavelmente explicado pela maior massa específica da cinza volante beneficiada em comparação com a cinza volante residual. Também é observado que as misturas com cinza volante beneficiada tem menores valores de porosidade e absorção de

água, podendo resultar em uma resistência mecânica e durabilidade geralmente melhores, pois os poros estão menos propensos a permitir a penetração de água e agentes agressivos.

Estudos conduzidos por Zhou *et al.* (2019), observou que a redução da massa específica no estado endurecido, está principalmente ligada ao baixo valor da massa específica das partículas de cinza volante.

Já com relação a influência do tamanho do grão da areia de britagem, em geral não houve uma alteração significativa da massa específica nas misturas com cinza volante residual. Já com relação a cinza volante beneficiada, é observada um pequeno aumento dos valores de massa específica, conforme há o aumento do tamanho dos grãos de areia de britagem. Este aumento foi de até 8%.

As misturas da matriz com areia natural foram as que apresentaram os maiores valores de massa específica, devido ao maior valor da massa específica da areia natural, em comparação com os valores de massa específica de todas as areias de britagem. As misturas da matriz com areia natural, também apresentaram uma ligeira redução dos índices de porosidade e absorção de água no estado endurecido em comparação com as areias de britagem.

Os valores de menor porosidade e absorção das misturas com cinza volante beneficiada em relação a residual, podem ser atribuídos ao processo de moagem. A cinza volante beneficiada possui grãos menores que preenchem melhor os espaços entre as partículas maiores, resultando em uma menor porosidade e capacidade de absorção de água, pois os grãos menores podem se acomodar mais próximos uns dos outros, diminuindo os espaços vazios e, conseqüentemente, a porosidade da mistura.

2.6.1.2.2 Resistência à compressão axial

Na Tabela 14 é possível verificar os valores de compressão axial e módulo de elasticidade da matriz. Vale ressaltar que são apresentados os valores médios, e entre parênteses é possível observar os seus respectivos desvios padrão.

Tabela 14 – Valores da resistência à compressão e módulo de elasticidade da matriz.

| Mistura | | f_c (MPa) | E_m (GPa) |
|---------------------------|-------------|--------------|--------------|
| Cinza Volante Residual | MR | 43,95 (1,31) | 19,96 (0,31) |
| | M0.3 | 39,52 (1,27) | 20,22 (0,09) |
| | M0.6 | 40,53 (1,26) | 19,41 (0,79) |
| | M1.2 | 41,54 (3,32) | 20,09 (0,11) |
| | M2.4 | 42,67 (3,54) | 19,94 (0,42) |
| Cinza Volante Beneficiada | MR | 50,89 (1,46) | 20,18 (0,47) |
| | M0.3 | 50,73 (3,47) | 21,05 (1,26) |
| | M0.6 | 49,82 (0,76) | 21,68 (0,12) |
| | M1.2 | 49,80 (0,69) | 21,19 (0,58) |
| | M2.4 | 51,84 (4,31) | 21,33 (0,66) |

Foi observado que a mistura MR com cinza volante residual, produziu resistência à compressão axial em média 11% maior do que a mistura com areia de britagem. Além disso, a resistência à compressão aumentou ligeiramente com o aumento do tamanho dos grãos. Já com a cinza volante beneficiada, as resistências foram similares.

Sahmaran *et al.* (2009), identificou que o aumento do tamanho máximo do agregado de 1,2 para 2,4 mm, não conduziu para uma alteração significativa na resistência à compressão. O mesmo foi encontrado neste estudo, já que na cinza volante residual houve um aumento insignificante, de somente 3%, da resistência à compressão entre as misturas M1.2 e M2.4. e para a cinza volante beneficiada não houve alteração significativa.

Com relação ao tipo de cinza utilizado nas misturas, foi observado que a matriz com cinza volante beneficiada obteve maiores valores de resistência à compressão axial do que as misturas com cinza volante residual, independentemente do tamanho do grão e do tipo de areia utilizada. Isso se deve pelo fato da cinza beneficiada ser moída e a finura da cinza volante tem influência direta na resistência à compressão, contribuindo para uma matriz mais densa e com menor porosidade total.

Quanto aos valores de módulo de elasticidade, observamos uma tendência das misturas com cinza volante beneficiada terem valores mais elevados dos que as com cinza volante residual, sendo que o maior percentual de variação foi da mistura M0.6 que foi de 11,70%.

2.6.1.2.3 Tenacidade à fratura

Na Tabela 15, é possível verificar os valores médios de tenacidade à fratura e energia de fratura, sendo entre parênteses os seus respectivos desvios padrão.

Tabela 15 – Valores da tenacidade à fratura (K_m) e energia de fratura da matriz (J_{tip}).

| Mistura | | K_m (MPa.m ^{1/2}) | J_{tip} (MPa) |
|---------------------------|------|-------------------------------|-----------------|
| Cinza Volante Residual | MR | 0,47 (0,02) | 10,81 (0,59) |
| | M0.3 | 0,46 (0,02) | 10,36 (0,85) |
| | M0.6 | 0,49 (0,02) | 12,38 (1,02) |
| | M1.2 | 0,52 (0,01) | 13,33 (0,64) |
| | M2.4 | 0,49 (0,01) | 11,95 (0,54) |
| Cinza Volante Beneficiada | MR | 0,55 (0,03) | 14,63 (2,05) |
| | M0.3 | 0,55 (0,02) | 14,11 (1,13) |
| | M0.6 | 0,62 (0,01) | 17,92 (0,43) |
| | M1.2 | 0,54 (0,03) | 13,69 (1,47) |
| | M2.4 | 0,61 (0,11) | 18,23 (6,47) |

Analisando os valores obtidos de tenacidade à fratura da matriz, de acordo com a literatura era esperado que quanto maior o tamanho do grão da areia, maior seriam os valores de tenacidade à fratura. Neste trabalho houve um aumento dos valores de tenacidade a fratura conforme aumentou o tamanho do grão da areia (ver Figura 42a),

mas esses valores não aumentaram de forma linear. Além disso, é possível observar que a tenacidade das misturas com o menor tamanho do grão de areia de britagem (M0.3), teve praticamente o mesmo valor que a areia natural (MR). E ao analisar a areia de britagem com maior granulometria (M2.4), há um aumento de 7% da tenacidade à fratura em comparação com a areia de britagem de menor granulometria (M0.3) com cinza volante residual e 11% com cinza volante beneficiada.

Segundo Paul e Zijl (2013), o aumento do tamanho das partículas de areia leva a uma maior tenacidade a fratura da matriz, o que representa um desafio para a ação de múltiplas fissuras, já que há um aumento da resistência à propagação de fissuras, que resulta em uma perda na ductilidade à tração do SHCC. Conforme o princípio micromecânico do SHCC, a tenacidade da matriz precisa ser limitada para poder ter o aumento do comportamento de múltipla fissuração, e assim alcançar o enrijecimento por deformação.

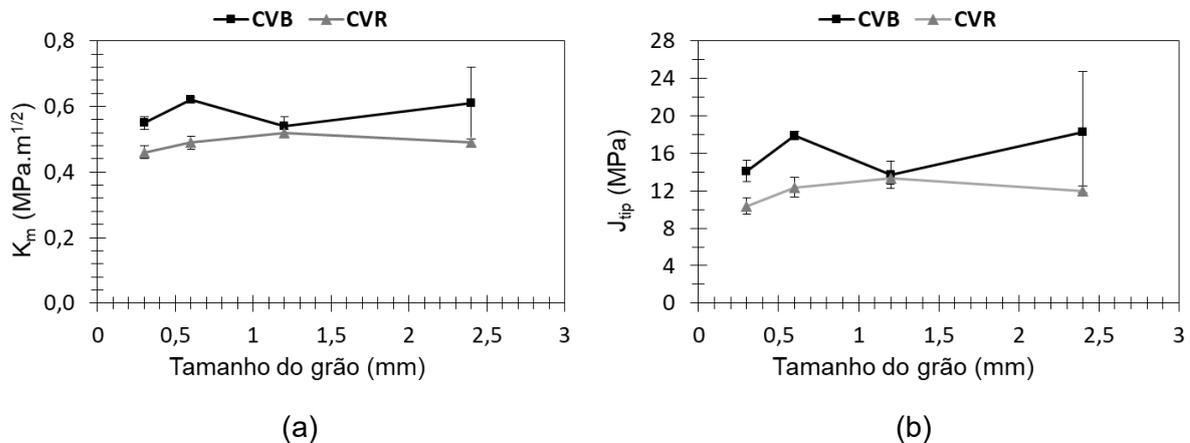


Figura 42 – Comportamento das misturas conforme o tamanho do grão e (a) tenacidade à fratura e (b) energia de fratura.

Podemos observar menores valores da tenacidade para as misturas MR e M0.3 com cinza volante residual. Já com cinza volante beneficiada, o menor valor obtido foi com a mistura M1.2, seguido pela mistura MR e M0.3. Vale observar que a diferença entre os valores de M1.2, MR e M0.3, é praticamente desprezível.

Foi possível também observar maiores valores de tenacidade a fratura nas misturas com cinza volante beneficiada. Isto ocorre devido as partículas mais finas de

cinza volante melhorarem a sua atividade pozolânica, e também possuem o efeito de enchimento físico, onde as partículas finas de cinza volante preenchem os vazios entre as partículas maiores dos materiais cimentícios. Esse fenômeno contribui para melhorar a compactação do material com redução da porosidade, gerando maiores valores de tenacidade à fratura.

Foi observado entre nas misturas com areia de britagem, a mistura M0.3-CVR foi a que teve o menor valor de tenacidade à fratura e maior valor de porosidade no estado endurecido. Poros na matriz podem atuar como concentradores de tensão, promovendo o início e a propagação de fissuras. 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.

Este resultado é consistente com o encontrado por Mai e Cotterell (1985), que demonstram a correlação entre menor tenacidade à fratura e maior porosidade em argamassa.

Com relação a energia de fratura da matriz (Figura 42b), foi observado menor energia de fratura na mistura M0.3-CVR e M1.2-CVB. Tem-se uma correlação entre a energia de fratura da matriz e a resistência à compressão, e é possível verificar que nas misturas com menor energia de fratura, obteve-se também menor resistência à compressão, conforme previsto e analisado na literatura através de estudos do Mehta e Monteiro (2014).

No geral, obteve-se uma maior energia de fratura ao aumentar o tamanho do grão da areia, para ambas as cinzas. Sabe-se que, ao ser submetido a carga, o compósito desenvolve fissuras ao longo das áreas mais fracas da zona interfacial ou dos poros maiores na matriz. Quando uma fissura encontra uma partícula de agregado, ela pode seguir dois caminhos: se propagar através do agregado, que é mais resistente, ou desviar-se ao redor da interface entre o agregado e a matriz de concreto.

Conseqüentemente, quando o tamanho do agregado aumenta, o caminho da fissura se torna mais complexo devido à presença de agregados maiores. Isso ocorre porque as fissuras tendem a seguir o caminho de menor resistência, e os agregados maiores oferecem obstáculos adicionais ao longo do percurso da fissura. Conseqüentemente, as fissuras precisam contornar esses agregados maiores,

resultando em um caminho de fissuração mais tortuoso e, muitas vezes, em uma maior dissipação de energia necessária para a propagação das fissuras. Isso pode levar a um aumento na resistência à fratura e na tenacidade do material, uma vez que as fissuras encontram maior resistência ao se propagarem através do compósito. Este efeito também ocorre, segundo Chen e Liu (2004), quando se aumenta o tamanho do agregado, mais complexo será o caminho da fissura.

2.6.1.2.4 Compressão diametral

Na Tabela 16, é possível verificar os valores médios da resistência por compressão diametral da matriz do SHCC, e entre parênteses tem-se os respectivos desvios padrão.

Tabela 16 – Valores da resistência por compressão diametral da matriz.

| Mistura | | Resistência (MPa) |
|---------------------------|------|-------------------|
| Cinza Volante Residual | MR | 2,71 (0,61) |
| | M0.3 | 3,13 (0,17) |
| | M0.6 | 2,66 (0,18) |
| | M1.2 | 2,97 (0,14) |
| | M2.4 | 2,78 (0,04) |
| Cinza Volante Beneficiada | MR | 2,87 (0,20) |
| | M0.3 | 3,29 (0,13) |
| | M0.6 | 3,31 (0,13) |
| | M1.2 | 3,07 (0,13) |
| | M2.4 | 3,43 (0,39) |

É possível observar que as misturas com cinza volante beneficiada obtiveram maiores valores em relação as misturas com cinza volante residual. Este comportamento já era esperado, tendo em vista que o beneficiamento da cinza volante faz com que as suas partículas fiquem menores, resultando no aprimoramento das suas propriedades. Cinzas volantes de grãos mais finos consomem mais hidróxido de cálcio, contribuem para uma matriz mais densa e com menor porosidade, melhorando a resistência à compressão e à tração. Quanto a influência do tamanho dos grãos nos valores de compressão diametral da matriz, não foi verificado uma correlação linear.

Com relação as misturas com areia natural e areia de britagem, para o mesmo tamanho do grão (MR e M0.3), foi encontrado valores de resistência à compressão diametral em torno de 15% maiores com a utilização de areia de britagem para ambas as cinzas. De acordo com Neville (2015), a aderência entre o agregado e a pasta de cimento é um importante fator da resistência. Com isso, os agregados de resíduo de brita apresentaram forma e textura do tipo lamelar e áspera, características estas que podem proporcionar um maior intertravamento, condicionado com isto a uma maior resistência ao esmagamento. A brita também tende a ter uma maior resistência mecânica em comparação com alguns tipos de agregados naturais, e isto pode contribuir para uma maior resistência pra compressão diametral.

2.6.2 Propriedades dos compósitos

2.6.2.1 Propriedades no estado fresco

As propriedades no estado fresco dos compósitos podem ser observadas na Tabela 17, onde constam os resultados do índice de consistência e da massa específica. Ressalta-se que são os valores médios e entre parênteses encontram-se os valores dos desvios padrão de cada mistura.

Tabela 17 – Propriedades no estado fresco das misturas do compósito SHCC.

| Mistura | | Índice de Consistência (mm) | Massa Específica (g/cm ³) |
|---------------------------|------|-----------------------------|---------------------------------------|
| Cinza Volante Residual | MR | 238,00 (0,21) | 1,84 |
| | M0.3 | 249,00 (0,25) | 1,87 |
| | M0.6 | 235,00 (0,26) | 1,87 |
| | M1.2 | 234,00 (0,45) | 1,91 |
| | M2.4 | 204,00 (0,41) | 1,92 |
| Cinza Volante Beneficiada | MR | 229,00 (0,45) | 1,99 |
| | M0.3 | 232,00 (0,33) | 1,98 |
| | M0.6 | 252,00 (0,69) | 1,98 |
| | M1.2 | 214,00 (0,34) | 1,96 |
| | M2.4 | 215,00 (0,34) | 1,96 |

Através do desvio padrão é possível verificar que não houve grandes variações no diâmetro do espalhamento das misturas dos compósitos, indicando que as misturas possuem uma consistência homogênea em toda a sua extensão. Podemos observar também que todas as misturas obtiveram boa consistência plástica variando de 204 a 252 mm e, através de observação visual, foi possível verificar uma boa dispersão das fibras. No geral, o índice de consistência foi menor com o aumento do tamanho do grão de areia de britagem, isto é em decorrência da dificuldade de interação entre as fibras e grãos maiores de areia, resultando em uma menor coesão e, conseqüentemente, em um índice de consistência menor.

Ao analisarmos a massa específica no estado fresco das misturas com cinza volante residual, é possível verificar que há um crescimento não muito significativo do valor conforme aumenta o tamanho do grão da areia. Quando verificamos as misturas com cinza volante beneficiada, praticamente não há uma variação entre as misturas MR, M0.3 e M0.6, tendo uma pequena redução do valor da densidade nas misturas M1.2 e M2.4. Isto significa que as misturas M1.2 e M2.4 com cinza volante beneficiada, foram as que contiveram mais vazios em comparação com as outras misturas. Provavelmente a interação das fibras, com o aumento do tamanho das

partículas de areia, com o uso da cinza volante moída, ocasionou o aumento dos vazios destas misturas.

No geral, as misturas com cinza volante beneficiada, obtiveram maiores valores de massa específica no estado fresco do que as com cinza volante residual. Isto é em decorrência da massa específica da cinza volante beneficiada ser maior do que a da cinza volante residual em média 5%.

2.6.2.2 Propriedades no estado endurecido

2.6.2.2.1 Propriedades físicas

As propriedades físicas no estado endurecido das misturas dos compósitos constam na Tabela 18, onde é possível verificar os valores médios da porosidade, absorção de água e massa específica, e entre parênteses têm-se os respectivos desvios padrão de cada mistura.

Tabela 18 – Valores das propriedades no estado endurecido das misturas de SHCC.

| Mistura | | Porosidade (%) | Absorção (%) | Massa Específica (g/cm ³) |
|---------------------------|------|----------------|--------------|---------------------------------------|
| Cinza Volante Residual | MR | 27,57 (0,46) | 16,27 (0,79) | 1,66 (0,02) |
| | M0.3 | 26,97 (1,39) | 16,44 (0,66) | 1,65 (0,02) |
| | M0.6 | 26,03 (0,77) | 15,89 (0,58) | 1,65 (0,01) |
| | M1.2 | 26,45 (0,34) | 15,97 (0,31) | 1,66 (0,00) |
| | M2.4 | 20,54 (0,28) | 11,63 (0,18) | 1,77 (0,00) |
| Cinza Volante Beneficiada | MR | 17,00 (0,56) | 9,19 (0,31) | 1,85 (0,00) |
| | M0.3 | 15,41 (0,32) | 8,09 (0,36) | 1,86 (0,01) |
| | M0.6 | 16,23 (0,62) | 8,75 (0,37) | 1,85 (0,01) |
| | M1.2 | 14,63 (0,68) | 8,09 (0,39) | 1,81 (0,00) |
| | M2.4 | 14,98 (0,26) | 8,27 (0,17) | 1,81 (0,01) |

No geral, os valores de absorção de água das misturas, são diretamente proporcionais aos valores da porosidade. É possível verificar ao analisar as misturas com cinza volante residual, que a mistura MR-CVR que possui areia natural, não apresentou muita variação nos valores de porosidade e absorção em relação a mistura M0.3-CVR, que possui areia de britagem. Já ao analisar estas mesmas areias nas misturas com a cinza volante beneficiada, essa variação já é um pouco mais perceptível, onde a mistura MR-CVB é 10% mais porosa que M0.3-CVB e possui 14% maior absorção. Os grãos de areia natural muitas vezes, em geral, tem formas arredondadas e texturas mais suaves, que pode resultar em uma maior quantidade de vazios entre os grãos e essa configuração pode aumentar a porosidade, diferente do que foi observado na matriz. Isto pode ser em decorrência da interação com a fibra.

Com relação a modificação do diâmetro máximo dos grãos das misturas com areia de britagem e cinza volante residual, a variação dos valores da absorção de água e porosidade é mínima, exceto para a mistura M2.4, onde é observado uma redução mais acentuada destes valores. Isto pode ser em decorrência de um maior adensamento dos corpos de prova desta mistura. Já ao analisar este mesmo item com cinza volante beneficiada, no geral, conforme aumentou o tamanho dos grãos das misturas, houve uma leve redução da porosidade e absorção.

Analisando os resultados de porosidade e absorção no geral, e comparando as duas cinzas volantes utilizadas no estudo, as misturas com cinza volante beneficiada são as que possuem menores valores. Isto é em decorrência do processo de moagem na qual a cinza passou, podendo resultar em uma melhor compactação, reduzindo a quantidade de vazios e poros, aumentando a sua atividade pozolânica e a redução da segregação, ou seja, este tipo de cinza pode contribuir para uma matriz mais densa e menos porosa.

A finura desta cinza promove também uma reação mais eficaz com os componentes do cimento durante a hidratação. Isso pode levar à formação de produtos de hidratação que preenchem os vazios na matriz, auxiliando também nessa redução da porosidade. Berry *et al.* (1989), sugeriram que as cinzas volantes grossas exibiam baixa atividade pozolânica, uma vez que continham uma alta proporção de fases cristalinas. A cinza volante fina é mais reativa e seu uso resultou em uma matriz de cimento mais densa e melhores propriedades mecânicas de argamassas (PERIS-MORA *et al.*, 1993).

Segundo Huang *et al.* (2009), geralmente a diminuição das propriedades mecânicas e durabilidade é associada com a alta porosidade. Também em estudo feito por Hsu *et al.* (2018), pode-se observar na micrografia da cinza volante moída, que há minúsculas partículas esféricas, redução do tamanho do espaço ou o refinamento dos poros. Segundo Kiattikomol *et al.* (2001), o aumento na finura da cinza volante moída resultou em uma microestrutura mais densa. Isso se deve ao aumento da área superficial e à diminuição das suas partículas porosas.

Analisando a massa específica no estado endurecido, foi observado um aumento do valor com o uso da cinza volante beneficiada, comportamento provavelmente explicado pela maior massa específica da cinza volante beneficiada em comparação com a cinza volante residual, e também devido a cinza volante beneficiada ser mais reativa. Isto é devido a sua maior finura, que contribui para uma matriz mais densa, o que reduz a porosidade e aumenta, conseqüentemente, a massa específica.

Já com relação ao tamanho do grão da areia, pode ser observado nas misturas com cinza volante residual que, conforme há o aumento do tamanho do grão, aumenta-se o valor da massa específica no estado endurecido. No entanto, com a cinza volante beneficiada aconteceu o inverso, conforme o aumento do tamanho do grão, ocorreu a redução da massa específica, semelhante ao que ocorreu no estado fresco.

2.6.2.2.2 Resistência à compressão axial

Na Tabela 19, é possível verificar os valores de compressão axial e módulo de elasticidade dos compósitos, ressaltando que são os valores médios e entre parênteses é possível observar os seus respectivos desvios padrão. É importante ressaltar que não foi possível obter a curva tensão vs. deformação da mistura M2.4 com cinza volante residual e de todas as misturas com cinza volante beneficiada, devido a estas misturas atingirem o limite da máquina de ensaio. Com isto, os corpos de prova destas misturas foram submetidos a ruptura em um equipamento diferente, onde não era possível a utilização de extensômetros para a medição da deformação.

Tabela 19 – Valores da resistência à compressão axial, módulo de elasticidade e deformação na tensão máxima do compósito SHCC.

| Mistura | | Resistência (MPa) | Módulo de Elasticidade (GPa) | Deformação na Tensão Máxima (%) |
|---------------------------|------|-------------------|------------------------------|---------------------------------|
| Cinza Volante Residual | MR | 35,47 (4,45) | 18,73 (1,57) | 0,32 (0,02) |
| | M0.3 | 37,25 (3,95) | 19,02 (0,72) | 0,37 (0,03) |
| | M0.6 | 37,48 (0,85) | 18,83 (0,35) | 0,35 (0,02) |
| | M1.2 | 37,44 (1,46) | 19,24 (0,35) | 0,37 (0,02) |
| | M2.4 | 34,85 (0,74) | 18,83 (0,33) | N/A* |
| Cinza Volante Beneficiada | MR | 56,13 (2,78) | 21,15 (0,60) | N/A* |
| | M0.3 | 57,13 (1,83) | 21,68 (0,76) | N/A* |
| | M0.6 | 58,13 (1,01) | 22,47 (0,19) | N/A* |
| | M1.2 | 59,45 (0,28) | 21,03 (0,51) | N/A* |
| | M2.4 | 60,24 (2,46) | 20,23 (0,20) | N/A* |

N/A*: Não aplicável.

Pode-se observar que não ocorreu aumento significativo da resistência à compressão axial dos compósitos conforme o aumento do tamanho do grão de areia, para as misturas com os dois tipos de cinza volante (ver Figura 43). Também é possível analisar que a resistência à compressão das amostras com o uso de areia de britagem, alcançaram maiores valores do que as que foram moldadas com areia natural, provavelmente devido a leve redução da porosidade das misturas M0.3 em relação a MR, conforme visto no item 2.6.2.2.1.

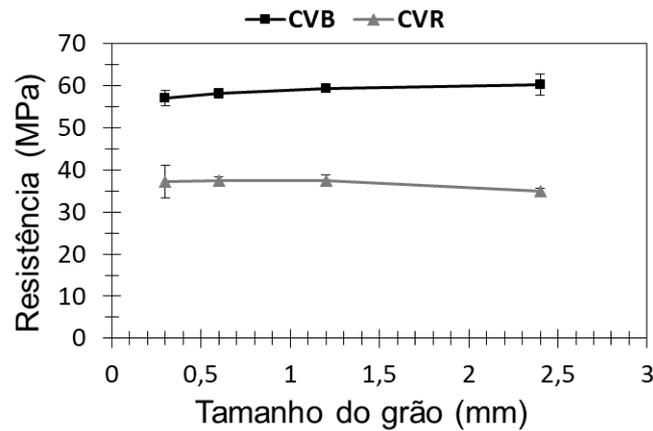


Figura 43 – Comportamento das misturas conforme resistência à compressão axial x tamanho do grão.

No estudo realizado por Mohammed e Mupparisetty (2022), foi constatado que a resistência à compressão da argamassa contendo areia de britagem apresentaram maiores resistências à compressão que as amostras com areia natural.

Com relação ao tipo de cinza utilizada nas misturas, conforme já esperado, foi observado que as misturas com cinza volante beneficiada obtiveram uma média de valores de compressão axial 60% maiores do que as misturas com cinza volante residual. Isso se deve ao fato da cinza volante beneficiada ser moída e a finura da cinza volante causa o aumento da sua atividade pozolânica, tendo influência direta na resistência à compressão, contribuindo para uma matriz mais densa e com menor porosidade total. Inúmeros estudos relatam que o uso de cinzas volantes mais finas melhoram significativamente a resistência à compressão (CHINDAPRASIRT *et al.*, 2004; MEHTA, 1985; SLANICKA, 1991; PAYÁ *et al.*, 1995).

Quanto aos valores de módulo de elasticidade, não houve uma uniformidade dos resultados, mas é possível observar que as misturas com cinza volante beneficiada possuem valores em média 13% maiores do que as misturas com cinza volante residual, devido, principalmente aos maiores valores de resistência à compressão das misturas com cinza beneficiada.

Estudos realizados por Cezar *et al.* (2019) em concretos, também apresentaram maiores valores de módulo de elasticidade nas misturas com cinza volante beneficiada em comparação com a cinza volante residual.

Também vale observar que os valores de resistência à compressão de todas as misturas variaram entre uma média de 35 e 60 MPa, sendo os resultados satisfatórios, já que conforme mencionado na revisão bibliográfica (item 1.6), um SHCC considerado com resistência normal, tem valores de resistência de 30 a 80 MPa.

2.6.2.2.3 Compressão diametral

Na Tabela 20 é possível verificar os valores médios de resistência à tração medido pelo ensaio de compressão diametral dos compósitos, e entre parênteses tem-se os seus respectivos desvios padrão.

Tabela 20 – Valores da compressão diametral do compósito SHCC.

| Mistura | | Resistência (MPa) |
|---------------------------|------|-------------------|
| Cinza Volante Residual | MR | 5,80 (0,45) |
| | M0.3 | 5,77 (0,17) |
| | M0.6 | 4,81 (0,05) |
| | M1.2 | 5,09 (0,29) |
| | M2.4 | 7,11 (0,31) |
| Cinza Volante Beneficiada | MR | 7,71 (0,46) |
| | M0.3 | 7,59 (0,27) |
| | M0.6 | 7,48 (0,36) |
| | M1.2 | 7,36 (0,43) |
| | M2.4 | 6,58 (0,67) |

É possível observar que as misturas com cinza volante beneficiada obtiveram maiores valores em relação as misturas com cinza volante residual. Este

comportamento já era esperado, tendo em vista os resultados de resistência à compressão. De acordo com Massaza (2003), cinzas volantes de granulometrias mais finas tendem a consumir mais hidróxido de cálcio, que contribui para uma matriz mais densa e com menor porosidade, melhorando a resistência à compressão e à tração. Isso ocorre devido à alta reatividade pozolânica da cinza volante moída, que proporciona uma maior área superficial para reação com o hidróxido de cálcio presente na solução de cimento.

Quanto a influência do tamanho do grão nos valores de resistência à tração por compressão diametral, em geral houve uma redução na resistência à compressão diametral, conforme o aumento do tamanho dos grãos de areia. Também podemos observar que não houve uma diferença significativa nos valores de compressão diametral ao substituir areia natural por areia de britagem com a mesma granulometria (MR e M0.3), com ambas as cinzas. O mesmo resultado foi encontrado no estudo de Cabral (2007), onde a substituição da areia natural pela britada não causou ganhos significativos na resistência à tração por compressão diametral em concretos.

2.6.2.2.4 Flexão

É possível observar as curvas tensão x deflexão das misturas estudadas nas Figuras 44, 45, 46, 47 e 48. A partir destas curvas, foram determinados os valores que constam na Tabela 21.

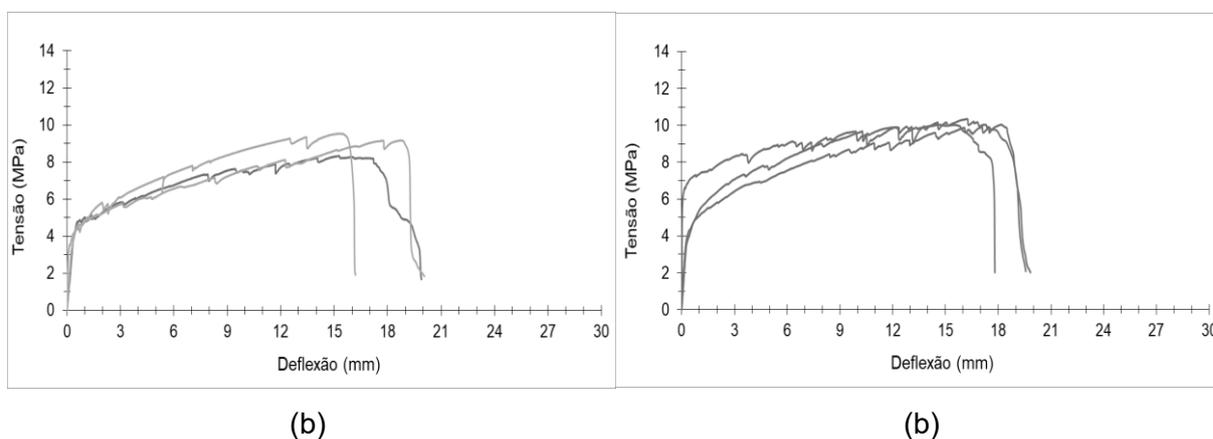
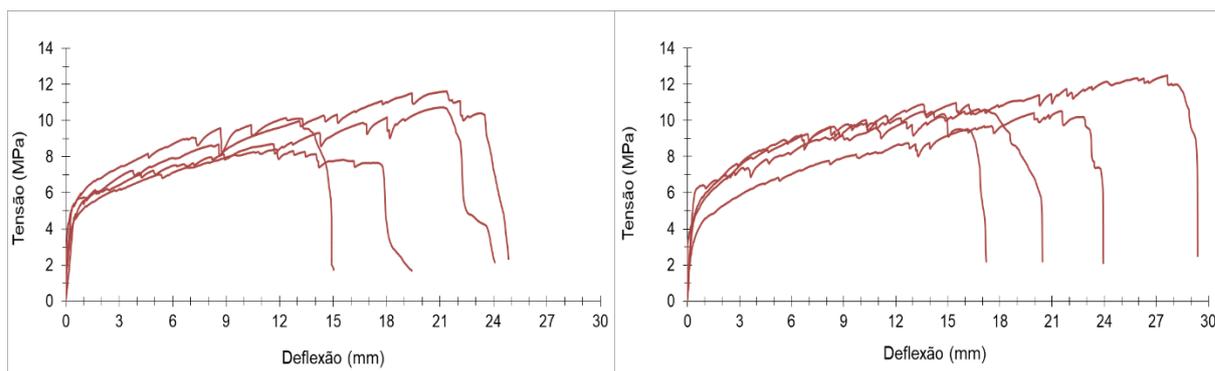


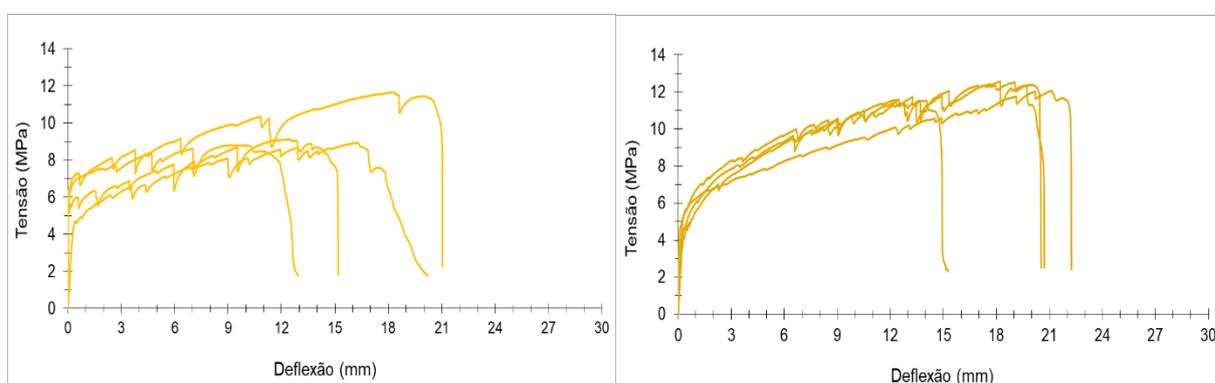
Figura 44 – Comportamento das misturas MR (a) CVR e (b) CVB sob flexão.



(a)

(b)

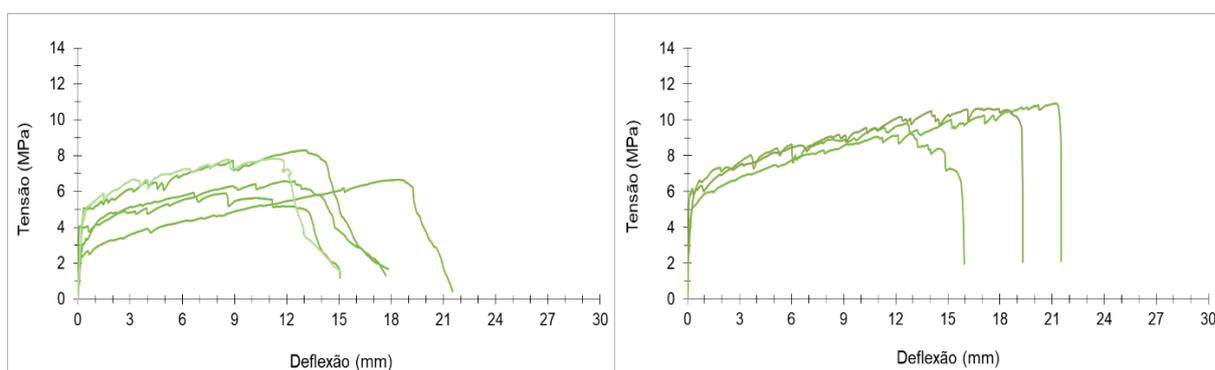
Figura 45 – Comportamento das misturas M0.3 (a) CVR e (b) CVB sob flexão.



(a)

(b)

Figura 46 – Comportamento das misturas M0.6 (a) CVR e (b) CVB sob flexão.



(a)

(b)

Figura 47 – Comportamento das misturas M1.2 (a) CVR e (b) CVB sob flexão.

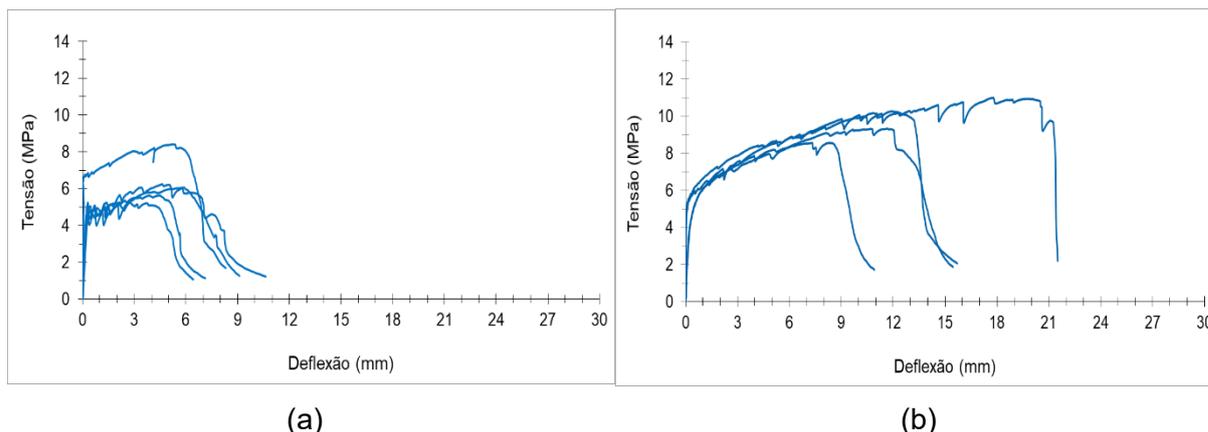


Figura 48 – Comportamento das misturas M2.4 (a) CVR e (b) CVB sob flexão.

Na Tabela 21, é possível verificar os resultados dos ensaios de flexão, onde se encontram os valores médios da tensão de primeira fissura, deflexão de primeira fissura, tensão máxima e deflexão na ruptura (capacidade de deflexão), tendo entre parênteses os seus respectivos desvios padrão.

Tabela 21 – Resultados do ensaio de flexão.

| Mistura | | Tensão de Primeira Fissura (MPa) | Deflexão de Primeira Fissura (mm) | Tensão Máxima (MPa) | Deflexão na Ruptura (mm) |
|---------------------------|------|----------------------------------|-----------------------------------|---------------------|--------------------------|
| Cinza Volante Residual | MR | 3,46 (0,28) | 0,37 (0,05) | 9,02 (0,50) | 17,32 (1,27) |
| | M0.3 | 4,45 (0,36) | 0,34 (0,06) | 10,24 (1,17) | 18,52 (3,45) |
| | M0.6 | 4,44 (0,20) | 0,33 (0,04) | 9,91 (1,24) | 15,60 (3,36) |
| | M1.2 | 4,18 (0,72) | 0,32 (0,04) | 7,06 (0,88) | 12,77 (0,62) |
| | M2.4 | 4,56 (0,34) | 0,30 (0,04) | 6,91 (1,07) | 6,65 (1,20) |
| Cinza Volante Beneficiada | MR | 3,94 (0,28) | 0,30 (0,01) | 10,15 (0,15) | 17,79 (0,61) |
| | M0.3 | 4,57 (0,98) | 0,29 (0,09) | 11,24 (0,75) | 19,15 (2,70) |
| | M0.6 | 4,58 (0,67) | 0,28 (0,03) | 12,40 (0,22) | 18,95 (2,50) |
| | M1.2 | 5,13 (0,73) | 0,24 (0,10) | 10,46 (0,47) | 18,35 (2,29) |
| | M2.4 | 4,88 (0,61) | 0,26 (0,01) | 10,20 (0,68) | 13,84 (4,61) |

Observando as curvas apresentadas nas Figuras 44, 45, 46, 47 e 48, elas mostram que as misturas produzidas apresentaram um comportamento dúctil de “deflection hardening”. Também é possível observar claramente uma diferença de comportamento pós-fissuração dos compósitos produzidos com cinza volante residual e cinza volante beneficiada. Os compósitos com cinza volante beneficiada, apresentaram maiores valores de tensão de primeira fissura e tensão máxima, mas menores de deflexão de primeira fissura. Ou seja, houve menor deformação ao atingir a primeira fissuração nos compósitos com cinza volante beneficiada.

A medida da deflexão de primeira fissura é importante na análise estrutural, pois fornece informações sobre a rigidez da estrutura antes do início da fissuração. Em alguns casos, projetistas e engenheiros consideram a deflexão de primeira fissura ao dimensionar estruturas para garantir que atendam aos requisitos de desempenho e segurança. Mas, ao analisar a deflexão pós-fissuração, esta foi maior para estes compósitos fabricados com cinza volante beneficiada.

Quanto a variação da granulometria, foi observado que, no geral, quanto maior o tamanho do grão, menores os deslocamentos médios. Mas a tensão de primeira fissura tende a ser maior com o aumento dos grãos, já a tensão máxima tende a ser menor, observando que esta variação não é linear, pois a mistura M0.6-CVB, obteve o maior valor de tensão máxima. Analisando a mistura M2.4 que é a mistura com dimensão máxima do agregado, observa-se que os valores máximos de tensão e deslocamento foram significativamente reduzidos em 32,52% e 64,09%, respectivamente, em relação a mistura M0.3 com cinza volante residual. Já com cinza volante beneficiada, essa redução foi menor, sendo 9,25% de redução da tensão máxima e 27,73% de redução do deslocamento.

Este impacto adverso do aumento do tamanho do grão da areia na ductilidade dos compósitos pode ser atribuído a influência negativa na dispersão uniforme das fibras ao interagir com grãos de areia maiores, bem como pelo fato de que um tamanho de agregado maior tender a elevar a tenacidade à fratura da matriz. Pode-se observar no item 2.6.1.2.3, que conforme aumentou o tamanho do grão de areia, houve a tendência de aumentar os valores da tenacidade a fratura. Estudos feitos por Sahmaran *et al.* (2009), obtiveram resultados semelhantes ao avaliar o efeito do tipo e tamanho do agregado na ductilidade e propriedades mecânicas do compósito do tipo SHCC.

Analisando as tensões e deslocamentos máximos das misturas com areia de mesma granulometria, mas de natureza diferentes (MR e M0.3), houve uma redução de 11,91% e 6,48%, respectivamente, da mistura com areia natural em relação a britada, para misturas com cinza volante residual. E com cinza volante beneficiada, houve uma redução de 9,70% e 7,10%, respectivamente. Isto pode ser devido a areia natural tender a ter partículas mais arredondadas e suaves, enquanto a areia de britagem pode conter partículas mais angulares e irregulares. A forma e textura das partículas podem influenciar a capacidade de intertravamento na matriz do composto, afetando assim sua resistência à flexão.

Na Figura 49, é possível verificar o comportamento da tensão máxima e a capacidade de deflexão das misturas conforme o tamanho dos grãos, e é possível observar que, no geral, conforme há o aumento do tamanho do grão, decresce os valores de tensão e deflexão máxima. Isto é atribuído ao aumento da tenacidade a fratura. Em estudos conduzidos por Li e Yang (2017), foi observada a mesma tendência ao analisar os resultados do ensaio de flexão e de tenacidade à fratura.

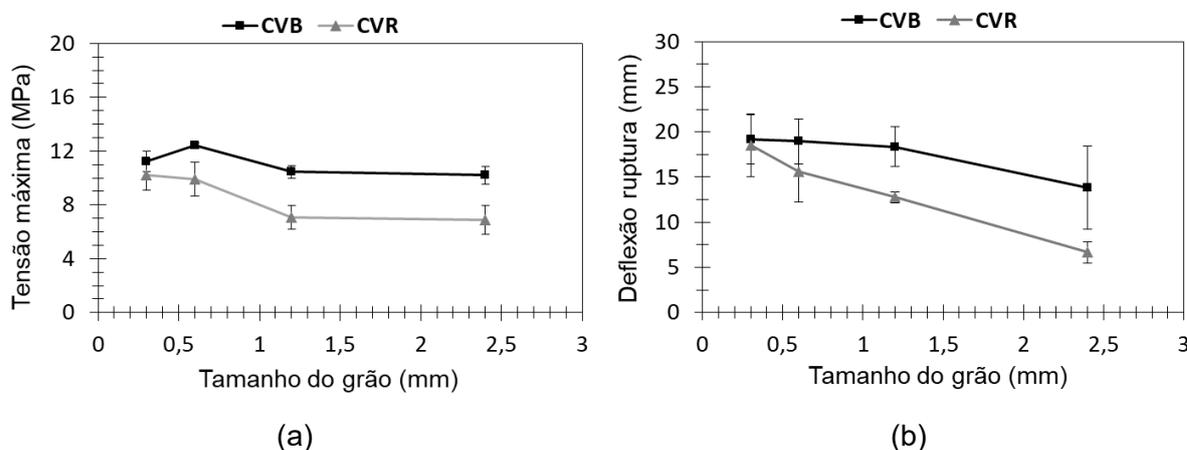


Figura 49 – Comportamento das misturas conforme o tamanho do grão e (a) a tensão máxima e (b) capacidade de deflexão.

Conforme esperado, analisando as misturas com cinza volante residual, a mistura M2.4 foi a que teve os menores valores de deformação média e tensão máxima. Igualmente é possível observar ao analisar somente as misturas com cinza volante beneficiada. Isto acontece devido a esta mistura ser a que contém o maior

tamanho máximo dos grãos de areia, que na presença de fibras, tende a levar a uma maior aglomeração e maior interação com as fibras na pasta. Também tende a aumentar a sinuosidade do caminho de fratura, aumentando a tenacidade a fratura da matriz, resultando no aumento da resistência à propagação de fissuras. Na Figura 50, é possível comparar o patamar de fissuração das diferentes misturas.

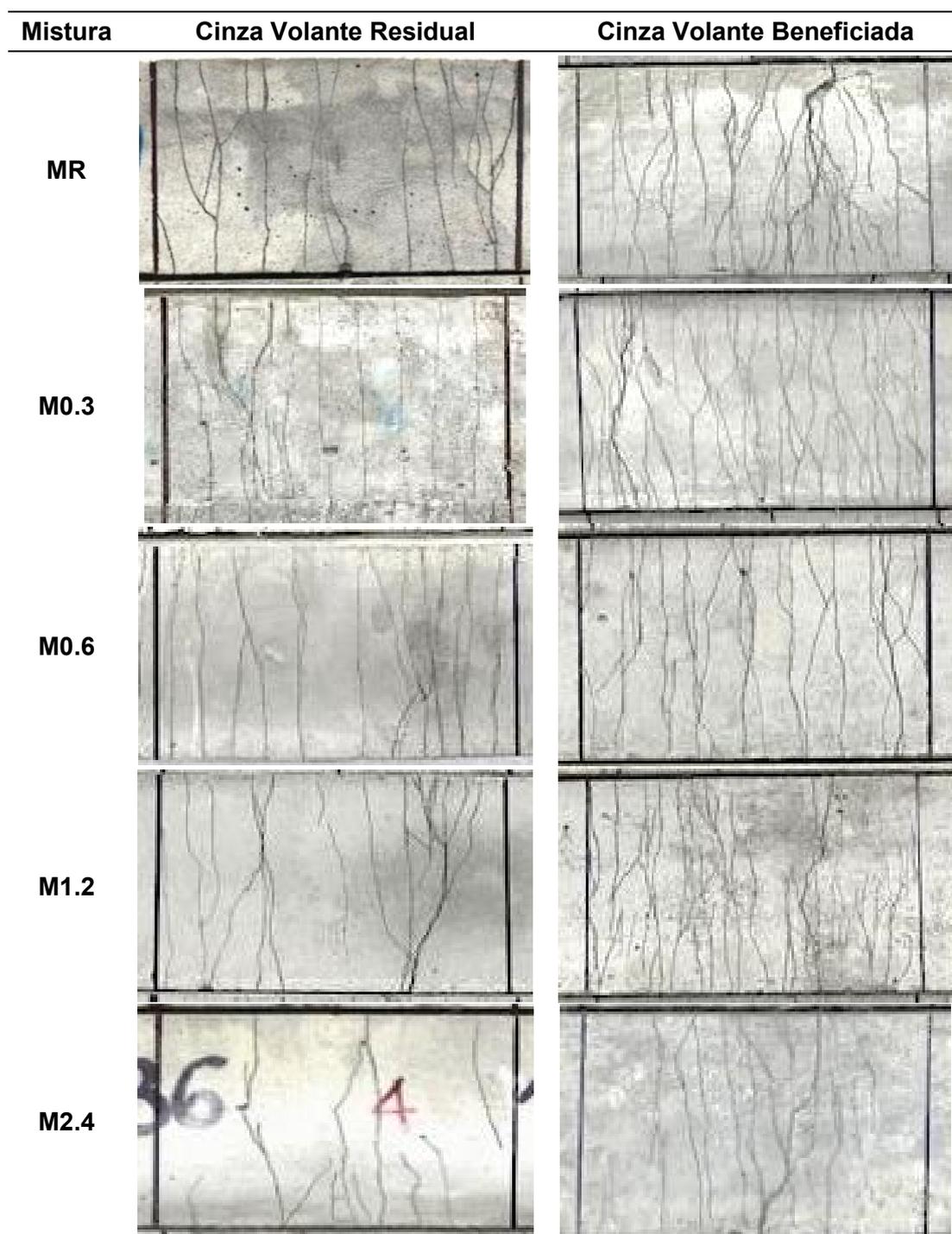


Figura 50 – Fissuras e microfissuras na área central dos corpos de prova após ensaio de flexão.

Ao verificar a Tabela 22, onde consta a quantidade de fissuras encontradas nos corpos de prova de flexão, é possível verificar que as misturas com cinza volante beneficiada tiveram maior quantidade de fissuras em relação as misturas com cinza volante residual. Também foi encontrado menor número de fissuras para as misturas com areia com tamanho de 2,4 mm. Estudos de Paul e Van Zijl (2013) também identificaram que o SHCC com areia grossa (tamanho dos grãos de 1,7 e 2,36 mm) apresentou menor capacidade de deformação, menor número de fissuras e maior abertura de fissuras do que o compósito com areia fina (tamanho dos grãos de 300 μm).

No entanto, vale ressaltar que as misturas produzidas neste estudo, tanto com cinza volante beneficiada, quanto com a residual, obtiveram comportamento dúctil com formação de múltiplas fissuras. Sendo assim, todas as misturas apresentaram ganho de resistência pós-fissuração na flexão, o que caracteriza um comportamento de *deflection hardening*.

Tabela 22 – Quantidade de fissuras nos corpos de prova de flexão.

| Mistura | | Quantidade de Fissuras (unidade) |
|------------------------------|------|-------------------------------------|
| Cinza Volante Residual | MR | 17 (5) |
| | M0.3 | 19 (5) |
| | M0.6 | 19 (5) |
| | M1.2 | 16 (4) |
| | M2.4 | 10 (4) |
| Cinza Volante Beneficiada | MR | 38 (4) |
| | M0.3 | 45 (5) |
| | M0.6 | 30 (3) |
| | M1.2 | 45 (4) |
| | M2.4 | 27 (3) |

2.6.2.2.5 Tração direta

Este é o principal ensaio mecânico utilizado para a caracterização do SHCC, devido ao seu comportamento diferenciado à tração. É possível observar as curvas tensão x deformação das misturas estudadas nas Figuras 51, 52, 53, 54 e 55. A partir destas curvas, foram determinados os valores que constam na Tabela 23.

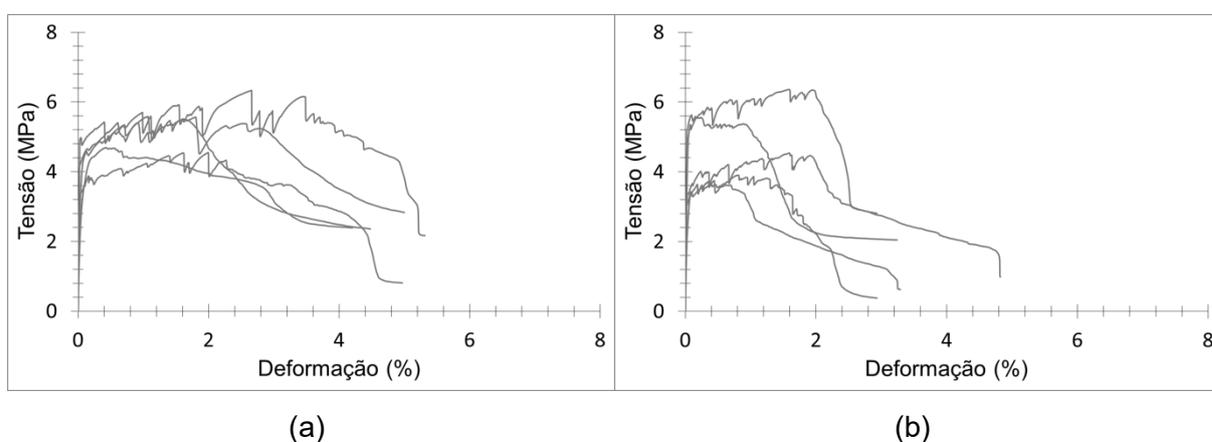


Figura 51 – Comportamento das misturas MR (a) CVR e (b) CVB sob carga de tração.

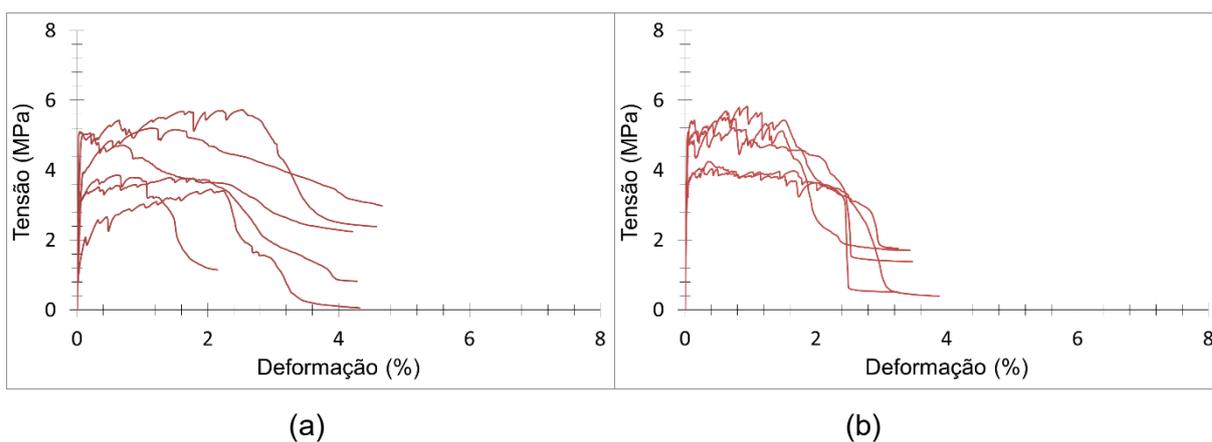


Figura 52 – Comportamento das misturas M0.3 (a) CVR e (b) CVB sob carga de tração.

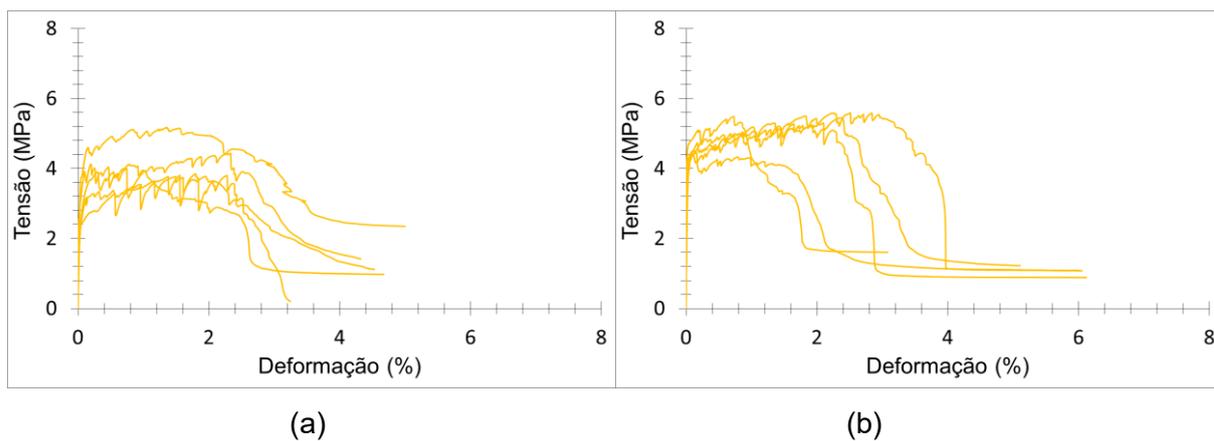


Figura 53 – Comportamento das misturas M0.6 (a) CVR e (b) CVB sob carga de tração.

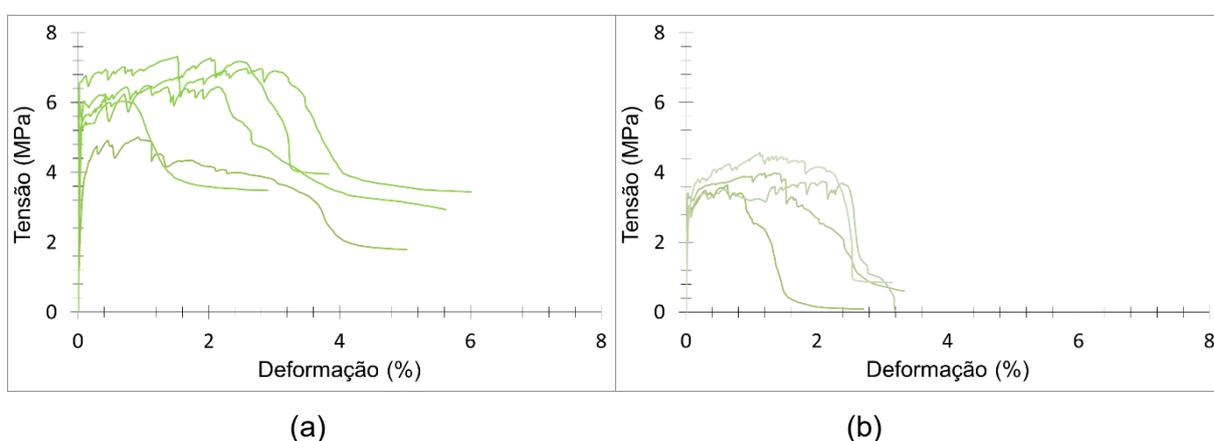


Figura 54 – Comportamento das misturas M1.2 (a) CVR e (b) CVB sob carga de tração.

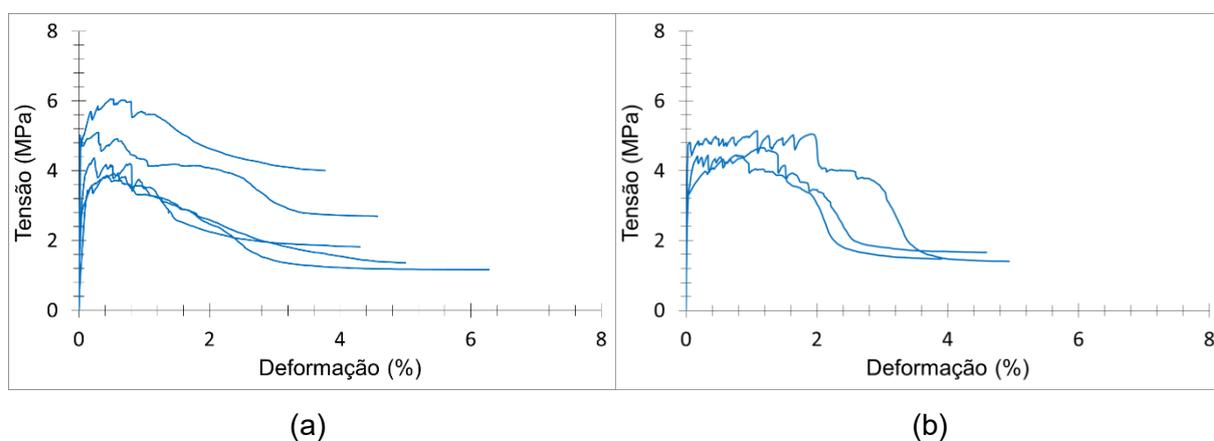


Figura 55 – Comportamento das misturas M2.4 (a) CVR e (b) CVB sob carga de tração.

Na Tabela 23, é possível verificar os resultados pertencentes ao ensaio de tração direta, onde teremos os valores médios da tensão de primeira fissura, deformação de primeira fissura, tensão máxima, deformação máxima e módulo de elasticidade, sendo que, entre parênteses, consta o seu respectivo desvio padrão.

Tabela 23 – Resultados do ensaio de tração direta.

| Mistura | | Tensão de Primeira Fissura (MPa) | Deformação de Primeira Fissura (%) | Tensão Máxima (MPa) | Deformação Máxima (%) | Módulo de Elasticidade (GPa) |
|---------------------------|------|----------------------------------|------------------------------------|---------------------|-----------------------|------------------------------|
| Cinza Volante Residual | MR | 3,94 (0,48) | 0,06 (0,04) | 5,05 (0,44) | 2,30 (0,47) | 19,13 (2,31) |
| | M0.3 | 3,66 (0,98) | 0,05 (0,02) | 4,47 (0,84) | 2,29 (0,36) | 19,09 (1,91) |
| | M0.6 | 3,33 (0,55) | 0,03 (0,02) | 4,27 (0,50) | 2,19 (0,57) | 19,54 (5,72) |
| | M1.2 | 5,45 (0,85) | 0,03 (0,02) | 5,83 (0,61) | 1,91 (0,63) | 19,43 (1,26) |
| | M2.4 | 3,88 (0,69) | 0,04 (0,02) | 4,66 (0,83) | 1,46 (0,23) | 19,15 (1,19) |
| Cinza Volante Beneficiada | MR | 3,96 (0,81) | 0,04 (0,02) | 5,11 (0,95) | 1,91 (0,14) | 19,30 (2,77) |
| | M0.3 | 4,37 (0,72) | 0,05 (0,01) | 4,97 (0,70) | 1,99 (0,39) | 19,73 (0,96) |
| | M0.6 | 4,24 (0,04) | 0,03 (0,01) | 5,25 (0,40) | 2,05 (0,74) | 20,74 (3,13) |
| | M1.2 | 3,28 (0,29) | 0,03 (0,02) | 4,14 (0,33) | 1,92 (0,54) | 20,83 (0,22) |
| | M2.4 | 3,84 (0,58) | 0,04 (0,01) | 4,75 (0,29) | 1,70 (0,21) | 19,56 (2,32) |

Analisando as curvas apresentadas nas Figuras 51, 52, 53, 54 e 55 e os valores na Tabela 24, é possível verificar que todas misturas, apresentaram um comportamento de *strain hardening*, que é definido quando a tensão máxima pós-fissuração é maior que a tensão de primeira fissura. Assim, observa-se um aumento na capacidade de carga e de deformação do compósito após o aparecimento da primeira fissuração. Na Figura 56, é possível ver as fibras cruzando uma fissura principal de um corpo de prova de tração.



Figura 56 – Detalhe da fissura principal do corpo de prova de tração.

É possível verificar que as misturas MR, M0.3 e M0.6 com cinza volante residual apresentaram capacidade de deformação superior a 2%, fazendo com que estes compósitos tenham em média de 200 vezes maior capacidade de deformação do que um concreto convencional. Já analisando as misturas com cinza volante beneficiada, praticamente todas as misturas apresentaram capacidade de deformação levemente abaixo de 2%, exceto a mistura M0.6. Essa redução na deformação das misturas ao utilizar uma cinza volante beneficiada nas misturas pode ser em decorrência da maior resistência e tenacidade à fratura destas misturas. Uma matriz mais resistente e com maior tenacidade a fratura tende a ter menor deformação sob tensão de tração.

Na Figura 57a, é possível verificar a variação do comportamento das misturas com relação a deformação máxima, conforme o tipo de cinza volante utilizado e o tamanho do grão de areia de britagem, e é possível observar também que conforme aumenta o grão de areia, a deformação diminui para os dois tipos de cinza volante. Conforme esperado, a capacidade de deformação da mistura com maior granulometria (M2.4) foi reduzida, onde a redução em relação a mistura M0.3 foi de 36,24% para cinza volante residual e de 14,57% para cinza volante beneficiada. Paul e Van Zijl (2013), encontraram resultados semelhantes ao analisarem SHCC com três granulometrias diferentes, onde a areia com maiores grãos apresentou menor deformação final a tração direta.

Com relação a tensão máxima (ver Figura 57b), ao analisar a variação da granulometria da areia, foi observado que houve uma variação não linear nos resultados referentes ao ensaio de tração direta. Todas as amostras alcançaram a

resistência à tração esperada, que de acordo com Li (2008), é de 4 a 12 MPa. E diferente dos demais ensaios, neste ensaio os resultados das amostras com cinza volante beneficiada não foram muito discrepantes das amostras com cinza volante residual. Também foi observado que o tamanho do grão e o tipo de cinza volante não teve uma influência linear nas tensões e deformações de primeira fissura.

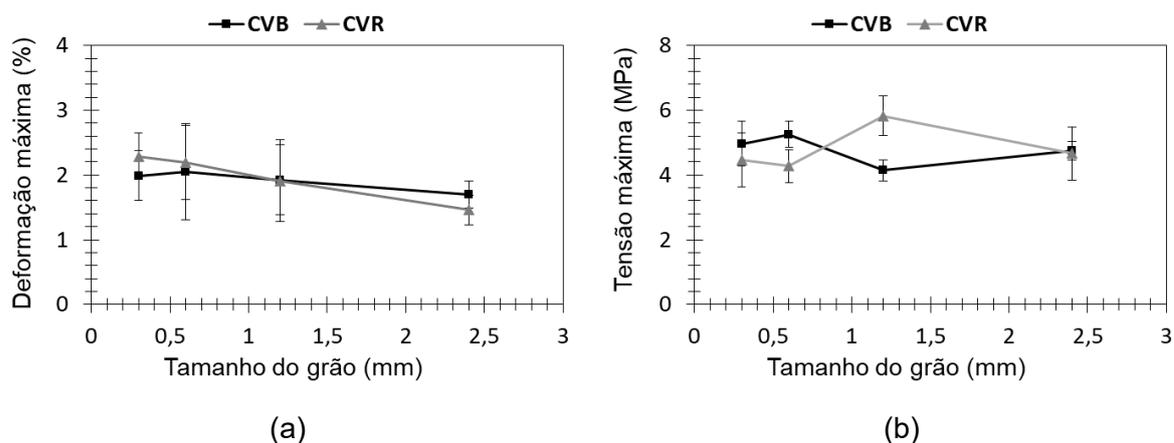


Figura 57 – Comportamento das misturas conforme o tamanho do grão e a (a) deformação máxima e (b) tensão máxima sob carga de tração direta.

De acordo com Perdikaris e Romeo (1995), o aumento do tamanho do agregado geralmente resulta em maior energia de fratura para o compósito e, conseqüentemente, em maior tenacidade à fratura. Com isto, conforme a teoria da micromecânica, espera-se que isto contribua para a redução da capacidade de deformação na tração.

Na Figura 58, é possível verificar a correlação entre a capacidade de deformação do SHCC estudado e a tenacidade à fratura da matriz, e é possível verificar que existe uma correlação, no entanto, essa correlação apresentou um baixo coeficiente de correlação. É importante destacar que o ponto referente a mistura M2.4-CVR foi removido do gráfico, devido a ser um *outliers*, que é um dado que possui alta discrepância dos demais resultados. Vale ressaltar que a capacidade de deformação de um compósito também depende da aderência fibra-matriz.

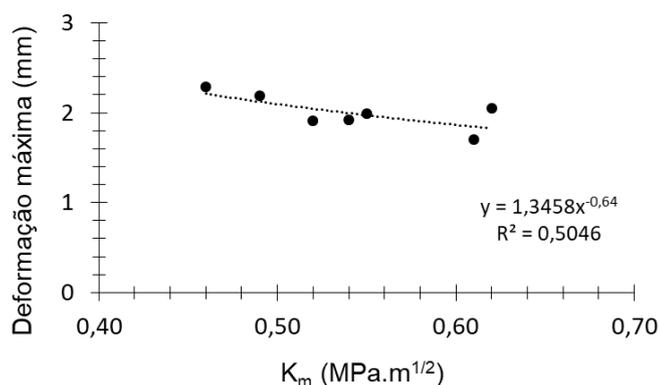


Figura 58 – Relação entre deformação máxima do SHCC e tenacidade à fratura da matriz.

Os valores do módulo de elasticidade do ensaio de tração direta tiveram variação inexpressiva, sendo que os maiores valores foram das misturas com cinza volante beneficiada. O módulo de elasticidade fornece uma medida da rigidez do material, indicando quão facilmente ele se deforma em resposta a uma carga aplicada, quanto maior este valor, maior a rigidez ou resistência do material à deformação elástica, quando submetido a uma carga. Então, estes maiores valores das misturas com cinza volante beneficiada indicam que estas misturas são menos suscetíveis a deformações quando sujeito a tensões. O que é confirmado ao observar os valores de deformação máxima.

Na Tabela 24, é possível verificar a quantidade de fissuras nos corpos de prova submetidos ao ensaio de tração direta, e no geral pode-se observar uma redução na quantidade de fissuras, conforme aumenta o tamanho do grão de areia. Esta redução na quantidade de fissuras é pertinente, já que foi encontrado uma diminuição nos valores da deformação máxima, conforme há o aumento dos grãos de areia. Ressaltando que as fissuras foram contadas com o auxílio de lupa. Na Figura 59 é possível ver os corpos de prova submetidos à tração e suas microfissuras.

Tabela 24 – Quantidade de fissuras nos corpos de prova de tração direta.

| Mistura | | Quantidade de Fissuras (Unid) |
|----------------------------------|-------------|--------------------------------------|
| Cinza Volante Residual | MR | 24 (3,30) |
| | M0.3 | 18 (5,02) |
| | M0.6 | 27 (4,69) |
| | M1.2 | 22 (1,63) |
| | M2.4 | 7 (2,87) |
| Cinza Volante Beneficiada | MR | 16 (4,15) |
| | M0.3 | 22 (2,48) |
| | M0.6 | 19 (2,50) |
| | M1.2 | 9 (2,60) |
| | M2.4 | 15 (1,70) |

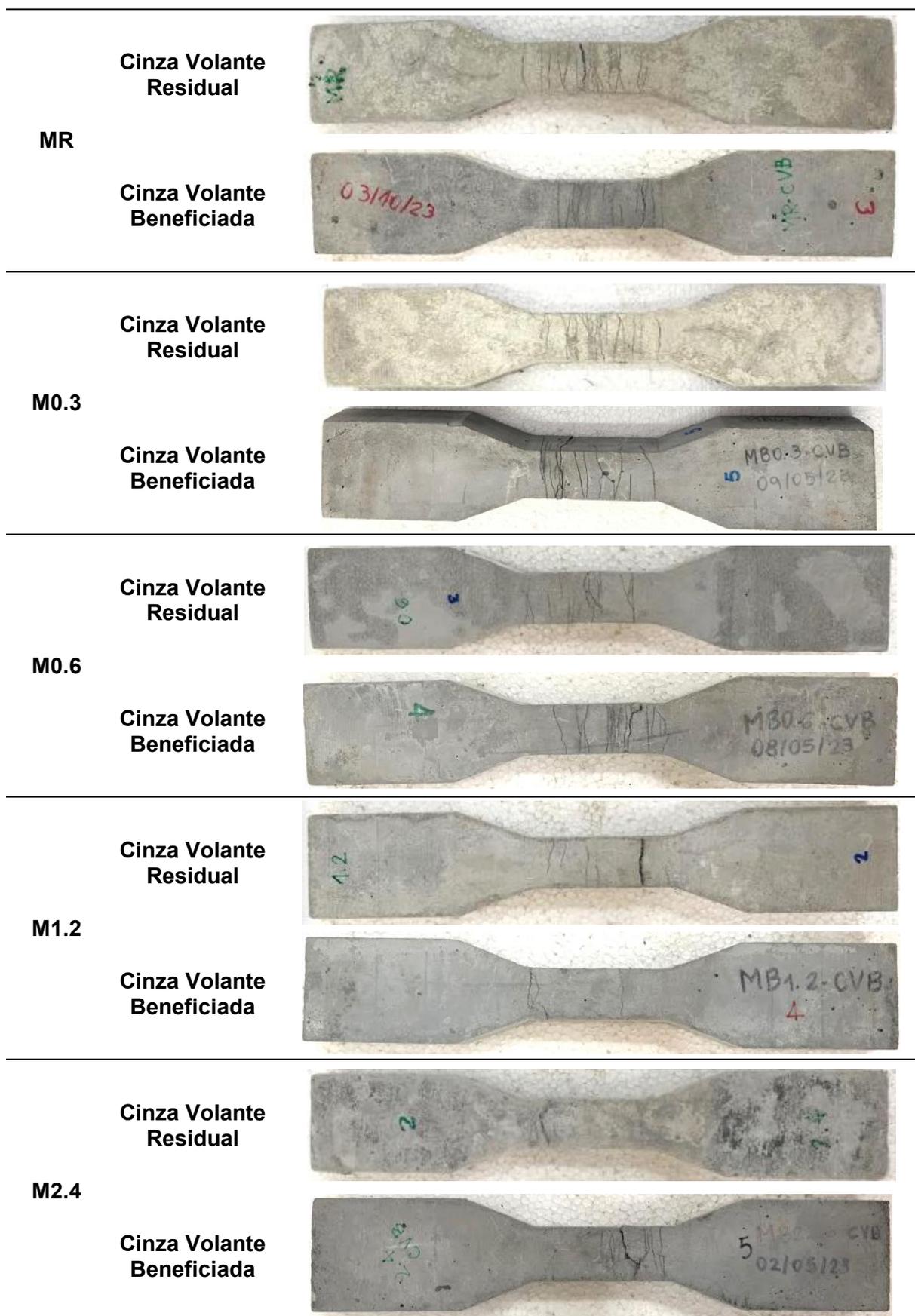


Figura 59 – Corpos de prova de tração ensaiados e as microfissuras contabilizadas.

3 APLICAÇÃO DO SHCC PARA O ENCAMISAMENTO DE CONCRETOS

3.1 Introdução

Neste capítulo, é apresentada a etapa do programa experimental desenvolvido para avaliar o comportamento prático do compósito do tipo SHCC elaborado neste estudo, onde a areia natural foi substituída por areia proveniente do resíduo de britagem. Esta etapa também foi conduzida no Laboratório de Engenharia Civil da UERJ, abrangendo a descrição dos materiais utilizados, a metodologia de preparo das amostras e os ensaios experimentais realizados.

O objetivo principal desta etapa do estudo é investigar a eficácia do SHCC com areia de britagem como reforço estrutural em concretos, utilizando a técnica de encamisamento. Para isso, foram selecionadas duas formulações de SHCC entre as misturas que apresentaram melhor desempenho nas avaliações iniciais.

Essa investigação detalhada permitirá uma compreensão abrangente do comportamento do SHCC com areia de britagem, fornecendo informações valiosas para sua aplicação em reparos estruturais. A Figura 60 apresenta o fluxograma detalhado com esta etapa da pesquisa.

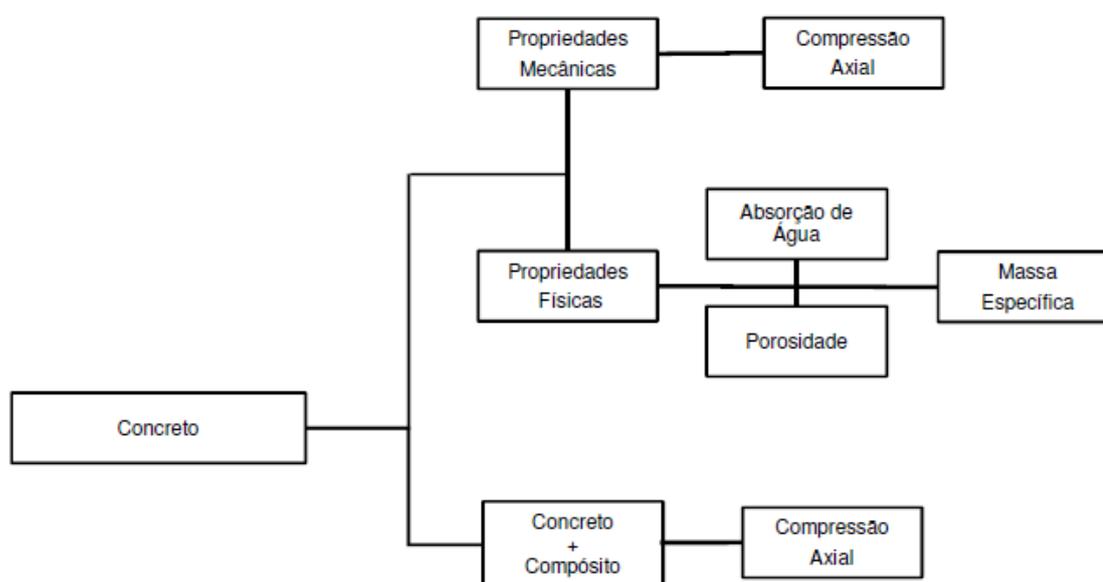


Figura 60 – Fluxograma com as etapas de estudos no concreto e concreto reparado (concreto + compósito) (AUTORA, 2023).

3.2 Materiais Utilizados na Fabricação do Concreto

3.2.1 Cimento

Foi utilizado o cimento Portland (C) do tipo CP II-F-32 do fabricante Lafarge Holcim. Possui a resistência mínima à compressão de 32 MPa, aos 28 dias de idade, conforme a norma NBR 7215 (2019). Sua massa específica foi determinada através dos procedimentos da norma NBR 16605 (2017), cujo valor é 3,03 g/cm³. Já o índice de finura, calculado a partir da NBR 11579 (2012), é de 0,64%. Os óxidos presentes no cimento estão dispostos na Tabela 25.

Tabela 25 – Óxidos presentes no cimento Portland.

| Óxidos | Cimento Portland (%) |
|--------------------------------|----------------------|
| Al ₂ O ₃ | 3,84 ± 0,07 |
| SiO ₂ | 13,38 ± 0,03 |
| P ₂ O ₅ | ND ^{a)} |
| SO ₃ | 3,03 ± 0,01 |
| K ₂ O | 0,137 ± 0,001 |
| CaO | 74,82 ± 0,09 |
| TiO ₂ | 0,25 ± 0,01 |
| Fe ₂ O ₃ | 3,82 ± 0,01 |
| SrO | 0,261 ± 0,001 |
| Outros | 0,243 |

a) ND – Não detectado.

3.2.2 Agregado miúdo

Foi utilizado como agregado miúdo na moldagem do concreto, a areia média lavada, comumente encontrada em lojas de materiais de construção. Na Figura 61, é possível observar a curva granulométrica desta areia, que foi determinada conforme a norma NBR 17054 (2022). A sua massa específica é de $2,70 \text{ g/cm}^3$, e foi determinada conforme a norma NBR 16916 (2021). A areia possui um diâmetro máximo de 4,75 mm e 2,31 de módulo de finura.

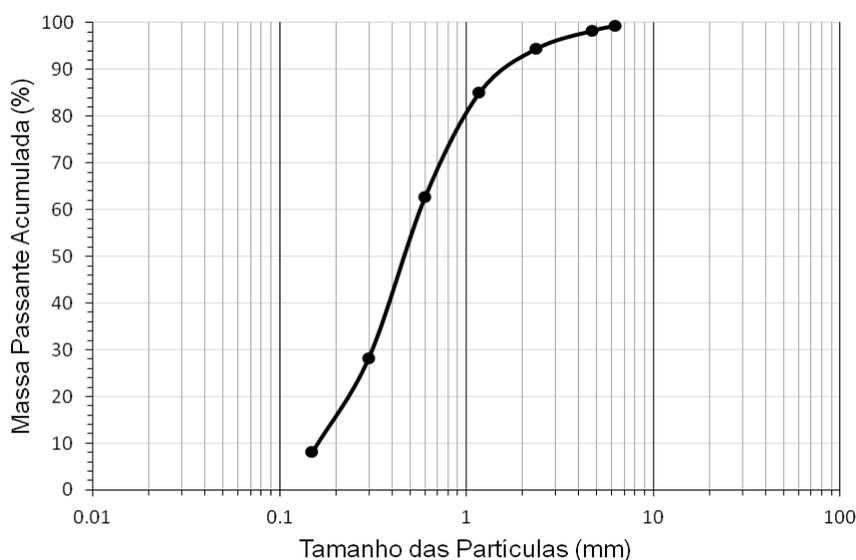


Figura 61 – Curva granulométrica do agregado miúdo.

3.2.3 Agregado graúdo

Como agregado graúdo foi utilizada a brita, que possui diâmetro máximo de 19 mm. Sua massa específica é de $2,70 \text{ g/cm}^3$, e foi determinada segundo a norma NBR NM 53 (2009). Na figura 62 é possível verificar a sua curva granulométrica, que foi determinada conforme a NBR 17054 (2022).

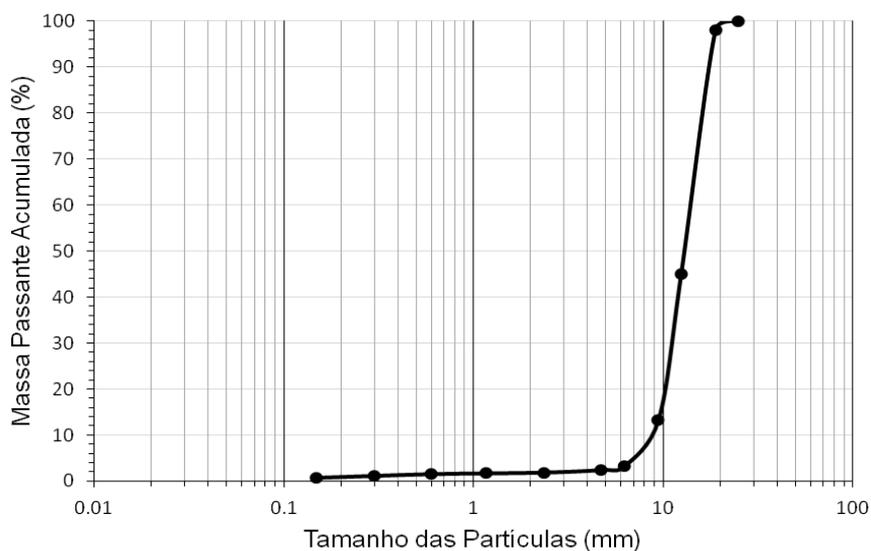


Figura 62 – Curva granulométrica do agregado graúdo.

3.2.4 Água

A água utilizada foi a mesma do compósito cimentício SHCC.

3.3 Moldagem do Concreto

A concretagem foi feita com o auxílio de uma betoneira de 100 litros (ver Figura 63). A classe do concreto utilizado neste estudo foi determinada conforme a NBR 6118 (2023) para estrutura de concreto armado em área urbana, sendo a classe C25. O traço utilizado foi de 1:1,82:2,22 e o fator a/mc foi de 0,46. Na Tabela 26, é possível verificar as quantidades dos materiais utilizados na mistura.



Figura 63 – Betoneira utilizada na concretagem.

Tabela 26 – Quantidade dos materiais utilizados na moldagem do concreto.

| Materiais | Quantidade (kg/m³) |
|------------------|--------------------------------------|
| Cimento | 421,31 |
| Areia | 708,41 |
| Brita | 940,92 |
| Água | 247,20 |

Todos os materiais foram previamente separados e pesados. Foram moldados corpos de prova cilíndricos de 10 cm de diâmetro e 20 cm de altura. A moldagem foi feita seguindo a recomendação da norma NBR 5738 (2015).

Após a moldagem, os corpos de prova foram cobertos com lona plástica com umidade, com o objetivo de impedir a perda de água para o meio externo, por 24 horas. Depois deste período, os corpos de prova foram desmoldados e levados para cura em tanque com água, onde ficaram até a idade de realização dos ensaios.

3.4 Tratamento dos Corpos de Prova de Concreto

Foram utilizados doze corpos de prova (CP) cilíndricos de concreto de 10 x 20 cm (diâmetro x altura) para executar o reforço com a técnica do encamisamento com compósito do tipo SHCC. Esta técnica consiste na adição de uma camada de SHCC ao redor do elemento a ser reforçado ou reparado. Para isto, primeiramente foi feito o preparo da superfície dos corpos de prova de concreto para poder receber uma camada do SHCC, e assim possuir uma aderência eficaz. Este preparo foi feito através da limpeza da superfície dos CPs e em seguida foi feita a rugosidade (Figura 64) com o auxílio de escova de aço.



Figura 64 – Rugosidade do CP.

Após isto, foi feito um pré-dano nos doze corpos de prova de concreto. Seis CPs de concreto foram previamente carregados à compressão axial até a sua carga máxima e, em seguida, descarregados (dano equivalente a 100% da resistência do concreto aos 28 dias de idade). Os outros seis corpos de prova de concreto foram previamente carregados até 80% da sua resistência, e depois descarregados (dano de 80% da resistência do concreto).

O objetivo desta pré-carga nos CPs foi avaliar a eficiência dos compósitos através do encamisamento de concretos danificados, com dois diferentes níveis de danos, já que os reforços são executados em estruturas com algum grau de dano.

3.5 Aplicação do Encamisamento

Para a execução da camada de reforço com o compósito do tipo SHCC, após análise dos resultados, foi escolhida a mistura com menor e maior tamanho máximo dos grãos de areia de britagem e com a cinza volante beneficiada, sendo estas as misturas M0.3-CVB e M2.4-CVB.

Para a aplicação dos reforços nos corpos de prova de concreto, foram feitas formas com tubo de PVC (policloreto de vinila) de 15 cm de diâmetro e 20 cm de altura, com o fundo feito de uma peça chamada CAP (refere-se a capa, também conhecido como tampão) também de PVC, que é utilizada para vedação de extremidades de tubos de PVC (Figura 65a). Foram feitos espaçadores com madeira para conseguir a correta centralização dos CPs, e assim assegurar a dimensão mínima da espessura da camada de reforço de SHCC, que foi de aproximadamente 2,5 cm.

Com o objetivo de analisar somente a camada de SHCC, também foram feitos CPs vazados, sem o uso do corpo de prova de concreto no centro. Para os CPs vazados, as formas foram feitas com um tubo de PVC de 15 cm e internamente foi inserido outro tubo de PVC de 10 cm de diâmetro e o fundo com CAP, também de PVC (Figura 65b e c). Neste fundo de CAP, foi feito um gabarito com auxílio de pregos, e assim foi encaixado o tubo interno de 10 cm, com o objetivo de não perder o seu alinhamento e o prumo, mantendo a espessura de aproximadamente 2,5 cm do CP vazado de SHCC.

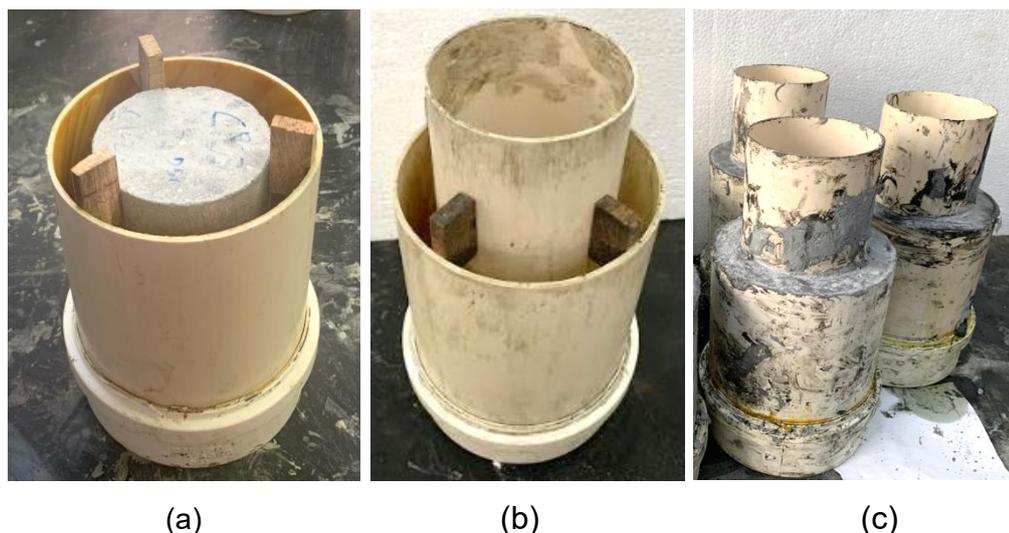


Figura 65 – (a) Forma de PVC para o encamisetamento do CP de concreto, (b) forma e (c) moldagem dos CPs vazados.

Os procedimentos do preparo dos compósitos do tipo SHCC foram conforme já descrito no item 2.4. Com cada mistura foi feito o reforço em 6 CPs de concreto pré-carregados, sendo 3 com dano de 100% e 3 com dano de 80%, e também moldados 3 CPs vazados. Após a moldagem (Figura 66a), os corpos de prova foram cobertos com lona plástica com umidade, com o objetivo de impedir a perda de água para o meio externo, por 24 horas. Depois deste período, os corpos de prova foram desmoldados (Figura 66b e c) e levados para cura em tanque com água, onde ficaram até a idade de realização dos ensaios.

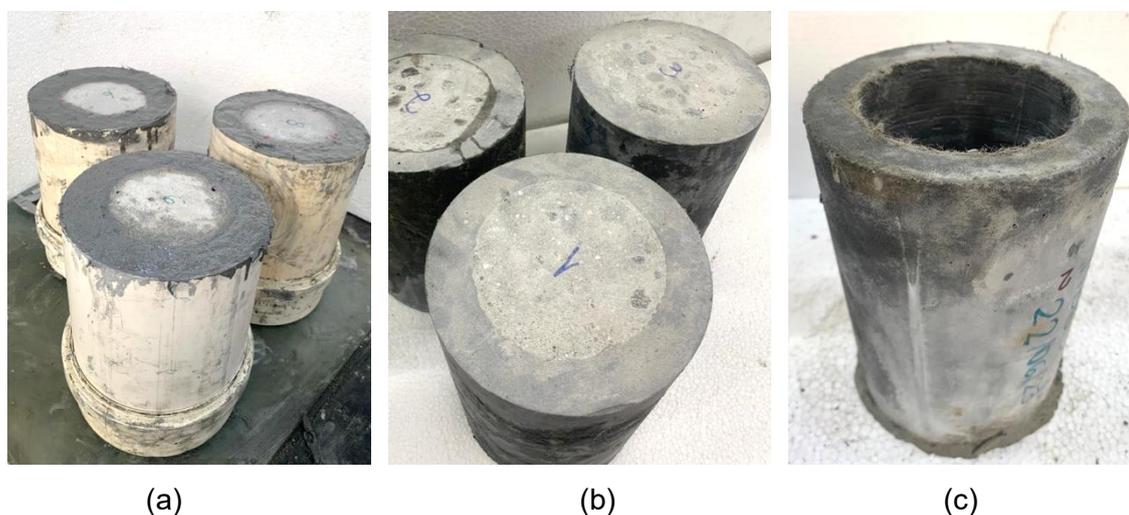


Figura 66 – (a) Moldagem e (b) desmoldagem do CP com reforço e do (c) CP vazado.

3.6 Ensaaios Experimentais no Concreto e Conjunto Reparado

3.6.1 Propriedades no estado fresco

Após a finalização da concretagem, e antes de iniciar a moldagem, foi realizado ensaio de consistência para verificar as propriedades do concreto no estado fresco.

3.6.1.1 Consistência

O ensaio de consistência do concreto fresco, é conhecido como ensaio de abatimento ou em inglês *slump test*. Este ensaio é regido pela norma NBR 16889 (2020), e consiste em fornecer uma indicação da trabalhabilidade do concreto, que se refere à facilidade com que o material pode ser misturado, transportado e acomodado nas formas.

Para realizar o ensaio, foram necessários os seguintes equipamentos: cone de Abrams (ou cone de ensaio de *slump*), placa de base para apoiar o cone, régua para medir o abatimento e haste metálica para compactação (Figura 67). Para a execução do ensaio, colocou-se o cone sobre a placa, e foi preenchendo com três camadas de concreto com espessura aproximadamente iguais. Cada camada foi adensada com o auxílio da haste metálica, onde foram desferidos 25 golpes.



Figura 67 – Equipamentos para o ensaio de consistência no concreto.

Após isto, a superfície foi regularizada e limpa, e removeu-se cuidadosamente o cone verticalmente para cima. Imediatamente após esta remoção, mediu-se a distância vertical entre a parte superior do cone de Abrams e a parte superior do concreto espalhado na placa base. Esta medida é expressa em milímetros.

3.6.2 Propriedades no estado endurecido

3.6.2.1 Porosidade, absorção de água e massa específica

Os ensaios de massa específica, porosidade (índice de vazios) e absorção de água, foram realizados conforme a norma NBR 9778 (2005) aos 28 dias de idade. Foram utilizados três corpos de prova cilíndricos com as dimensões de 10 x 20 cm (diâmetro x altura).

3.6.2.2 Resistência à compressão axial

O ensaio de resistência à compressão axial foi realizado primeiramente em três corpos de prova cilíndricos de concreto com dimensões de 10 x 20 cm (diâmetro x altura), assim como também foi determinado o seu módulo de elasticidade. Para a determinação do módulo de elasticidade destes corpos de prova, foi feito ensaio de compressão axial através de controle de carga, de acordo com a norma NBR 8522-1 (2021), em uma máquina universal com capacidade de carga de 2000 KN. Foram utilizados dois transdutores de deslocamento, onde a variação de deslocamento foi obtida através da média dos dois transdutores.

O ensaio de resistência à compressão axial também foi feito nos doze corpos de prova reforçados por meio do encamisamento com compósito do tipo SHCC (conjunto reforçado de concreto + compósito) e nos seis corpos de prova vazados moldados somente com SHCC. Este é um dos ensaios mais comuns realizados no concreto e/ou argamassa e fornece informações cruciais sobre a sua qualidade, sendo regido pela norma NBR 5739 (2018).

Para a correta execução do ensaio, foi necessário preparar as amostras. Para isto, primeiramente os CPs foram faceados (Figura 69a) com o auxílio de uma máquina retificadora da fabricante Secmix (Figura 68a), com o objetivo de garantir a sua superfície plana e paralela. Somente os CPs vazados foram nivelados com a técnica de capeamento descrita no item 2.5.2.2 (Figura 69b). Os CPs também foram lavados e colocados para secar em temperatura ambiente. Após isto, o ensaio foi realizado em uma prensa da fabricante Forney, conforme a Figura 68b, com capacidade de 100 toneladas.

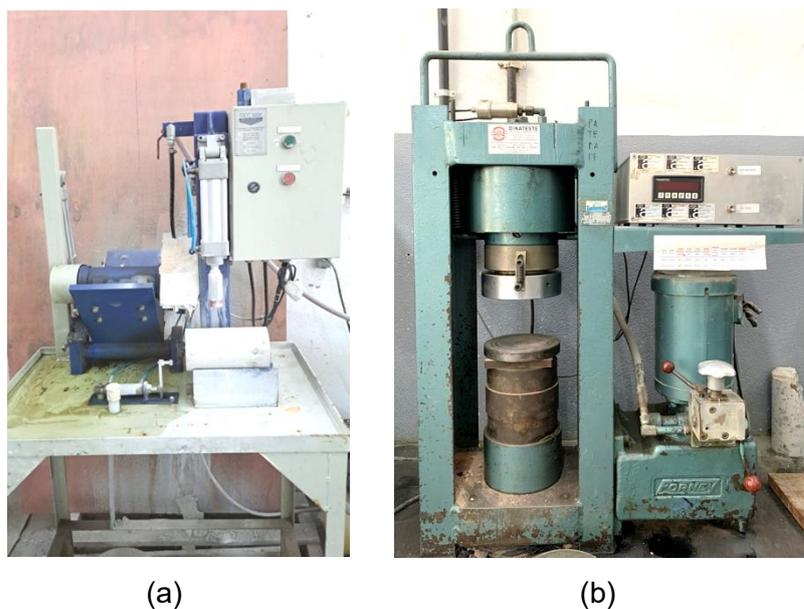


Figura 68 – (a) Máquina retificadora e (b) prensa utilizada no ensaio de compressão axial.

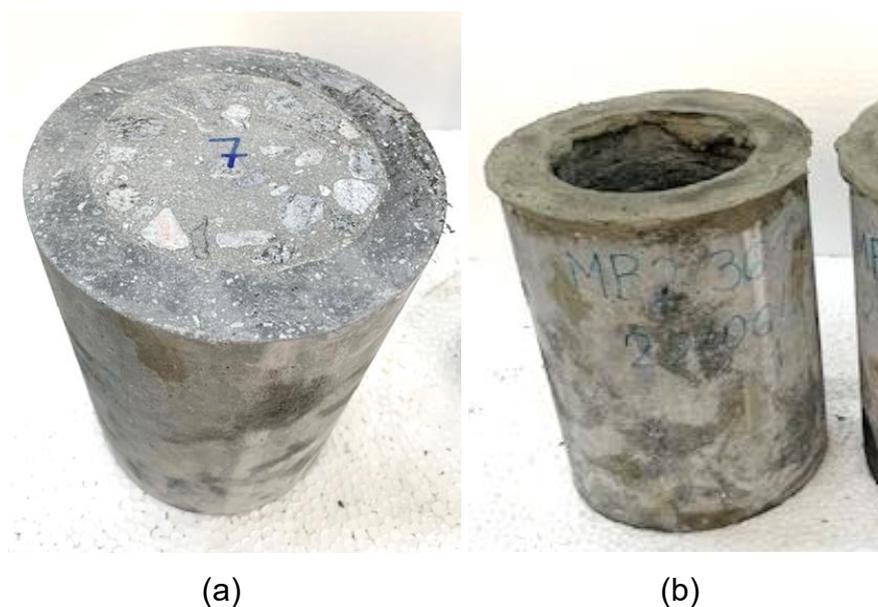


Figura 69 – (a) CP com reforço de SHCC nivelado na máquina retificadora e (b) CP de SHCC vazado, nivelado com a técnica de capeamento.

Este ensaio foi feito aos 28 dias de idade dos três corpos de prova de concreto. Já os CPs do conjunto reforçado por meio do encamisamento com SHCC, foram ensaiados aos 56 dias de idade do corpo de prova concreto, e 28 dias de idade do reforço de compósito de SHCC. Devido a isto, foram ensaiados também três corpos de prova de concreto de 10 x 20 cm (diâmetro x altura) com 56 dias de idade (CPs

sem o reforço). Os corpos de prova vazados de compósito do tipo SHCC, foram ensaiados aos 28 dias de idade. Na Figura 70, é possível verificar a configuração do ensaio de compressão axial no CP de concreto com reforço de SHCC.



Figura 70 – Ensaio de compressão axial no CP de 15 x 20 cm reforçado com SHCC.

3.7 Resultados e Discussões

3.7.1 Propriedades do concreto

Na Tabela 27 é possível verificar as propriedades físicas do concreto no estado fresco e endurecido, e na Tabela 28 é possível ver os valores médios da resistência à compressão axial dos concretos e dos compósitos utilizados como reforço, para efeito de comparação. Ressaltando que entre parênteses está o seu respectivo desvio padrão.

Tabela 27 – Propriedades físicas do concreto.

| Estado | Propriedades | Valor Médio |
|-------------------|---------------------------------------|--------------------|
| Fresco | Consistência (mm) | 21,00 |
| Endurecido | Massa Específica (g/cm ³) | 2,19 (0,01) |
| | Absorção de Água (%) | 8,28 (0,09) |
| | Porosidade (%) | 18,12 (0,11) |

Tabela 28 – Valores da resistência à compressão e módulo de elasticidade do concreto e reparos.

| Material | Módulo de Elasticidade (GPa) | Resistência à compressão (MPa) | |
|--------------------------|-------------------------------------|---------------------------------------|----------------|
| | 28 dias | 28 dias | 56 dias |
| Concreto | 30,61 (2,73) | 25,52 (0,97) | 28,09 (0,59) |
| Reparo - M0.3-CVB | 21,68 (0,76) | 57,13 (1,83) | N/A* |
| Reparo - M2.4-CVB | 21,33 (0,66) | 60,24 (2,46) | N/A* |

N/A*: Não aplicável.

É possível verificar um acréscimo de 10% da resistência à compressão dos corpos de prova de concreto aos 56 dias de idade, comparado aos 28 dias. Também verificamos que os compósitos projetados para reforçar os corpos de prova de concreto, exibem propriedades mecânicas superiores às dos concretos convencionais utilizados neste estudo.

3.7.2 Propriedades do conjunto reforçado

Na Tabela 29 são apresentados os valores médios das resistências à compressão axial dos concretos reforçados (concreto + compósito), dos corpos de

prova de concreto e dos cilindros vazados de compósitos utilizados como reforço. Além disso, são apresentados também entre parênteses os respectivos desvios padrões. O fator de eficiência é calculado através da divisão da resistência do corpo de prova reforçado pela resistência do concreto de referência na mesma idade (56 dias). Nos resultados foi utilizada a nomenclatura D80 para corpo de prova com 80% de dano e D100 para corpo de prova com 100% de dano.

Tabela 29 – Valores da resistência à compressão do conjunto reforçado e do corpo de prova vazado de SHCC, e fator de eficiência do conjunto reforçado.

| Material | Dano (%) | Resistência (MPa) | Fator de Eficiência |
|-----------------------------|-----------------|--------------------------|----------------------------|
| Concreto | N/A* | 28,09 (0,59) | N/A* |
| SHCC Vazado M0.3-CVB | N/A* | 39,51 (1,43) | N/A* |
| SHCC Vazado M2.4-CVB | N/A* | 43,19 (1,39) | N/A* |
| Concreto + M0.3-CVB | 80 | 38,90 (0,22) | 1,38 |
| | 100 | 41,09 (1,75) | 1,46 |
| Concreto + M2.4-CVB | 80 | 39,03 (1,34) | 1,39 |
| | 100 | 38,49 (1,51) | 1,37 |

N/A*: Não aplicável.

Foi observado que o conjunto com reforço M0.3-CVB com aplicação de 80% de dano, teve um aumento de 38% da resistência em relação ao corpo de prova de concreto sem o reforço na mesma idade. Já o conjunto com reforço M2.4-CVB com aplicação de 80% de dano, teve um aumento de 39%. Isto indica que o desempenho foi o mesmo para ambas as misturas, sendo as duas misturas eficazes no reparo do concreto.

Já analisando os conjuntos com aplicação de dano de 100%, observamos o inverso, o conjunto com reforço M0.3-CVB teve um aumento de resistência de 46%, enquanto o M2.4-CVB teve um aumento de 37%. Isto significa que ao analisar o conjunto com dano de 100%, o uso da mistura com areia de britagem com

granulometria de 0,3 mm, obteve 7% a mais de resistência à compressão em relação a mistura com granulometria de 2,4 mm.

Ressaltando que na prática, se levarmos o dano de uma estrutura até 100% da sua capacidade, estamos levando esta estrutura a sua ruína. Mas para efeitos de pesquisa, forçamos a estrutura a seu máximo, para poder verificar o poder de recuperação do SHCC, analisando o suporte máximo que este compósito desenvolvido nesta pesquisa, pode dar ao concreto em análise laboratorial. Assim, podemos verificar que se este SHCC estiver aplicado como uma camada de 2,5 cm em uma estrutura de concreto, e esta estrutura apresentar uma falha local de 100%, o SHCC poderá suportar esse acréscimo de carga de compressão, não levando a peça imediatamente ao colapso.

Contudo, é importante observar que o reforço de SHCC empregado neste estudo demonstrou resultados satisfatórios de resistência, independentemente do nível de dano do núcleo de concreto analisado nesta pesquisa, o que sugere sua eficácia como material para reforço estrutural. Além disso, não foi observado rompimento por aderência nos corpos de prova reforçados.

Com relação ao fator de eficiência, foi verificado uma variação de 1,37 a 1,46, considerando os corpos de prova com dano de 80 e 100%. Valores estes semelhantes ao encontrado no estudo de Al-Gemeel *et al.* (2019), que ao estudarem o confinamento do concreto com SHCC e com SHCC juntamente com tecido de basalto, ao analisar sua aplicação em núcleos de concreto com duas resistências diferentes, encontraram fatores de eficiência de 1,2 a 1,5 para o núcleo de concreto com menor resistência, e de 1,1 a 1,31 para núcleos de concreto com maior resistência. Ressaltando que os danos analisados foram de 50% e 80% da carga de pico dos corpos de prova de concreto. Estes autores tiveram como resultado que o material estudado é eficiente na utilização como reforço estrutural.

Já analisando os valores de resistência à compressão axial somente da camada de 2,5 cm de SHCC com cinza volante beneficiada nas granulometrias de 0,3 mm e 2,4 mm, os resultados encontrados para M0.3-CVB e M2.4-CVB são maiores cerca de 41% e 54%, respectivamente, em relação ao concreto usado como base. Assim, foi observado que os corpos de prova reforçados, em geral, romperam devido a atingirem a resistência do compósito utilizado como reparo. E por sua vez, a resistência à compressão axial dos corpos de prova vazados foram menores do que

os valores de resistência à compressão axial encontrados nos corpos de prova de 5 x 10 cm (diâmetro x altura), do item 2.5.2.2.

Nas Figuras 71 e 72, pode ser observado os corpos de prova rompidos. É possível verificar que conforme a norma NBR 5739 (2018), o tipo de ruptura foi cônica e bipartida. Este tipo de ruptura é considerada a ruptura típica ou desejável pois, significa que a carga aplicada foi distribuída corretamente em toda área de contato entre a prensa e o corpo de prova. De acordo com Neville e Brooks (2013), o modo de ruptura está diretamente ligada a forma de execução do ensaio e não a resistência. Assim, pode-se saber, por exemplo, se houve uma falha ao utilizar a máquina ou ao retificar o corpo de prova.

Também foi possível observar que os corpos de prova reforçados por meio do encamisamento com compósito do tipo SHCC, após a execução do ensaio de compressão axial, exibiram uma ruptura dúctil, acompanhada pela formação de diversas microfissuras. A formação dessas microfissuras pode ter contribuído para evitar a ruptura abrupta do corpo de prova reforçado, indicando que o SHCC desempenhou adequadamente seu papel. Portanto, é crucial destacar que as fibras conseguiram cumprir sua função como reforço, mesmo ao interagir com a areia de britagem, transferindo as tensões ao redor das fissuras.

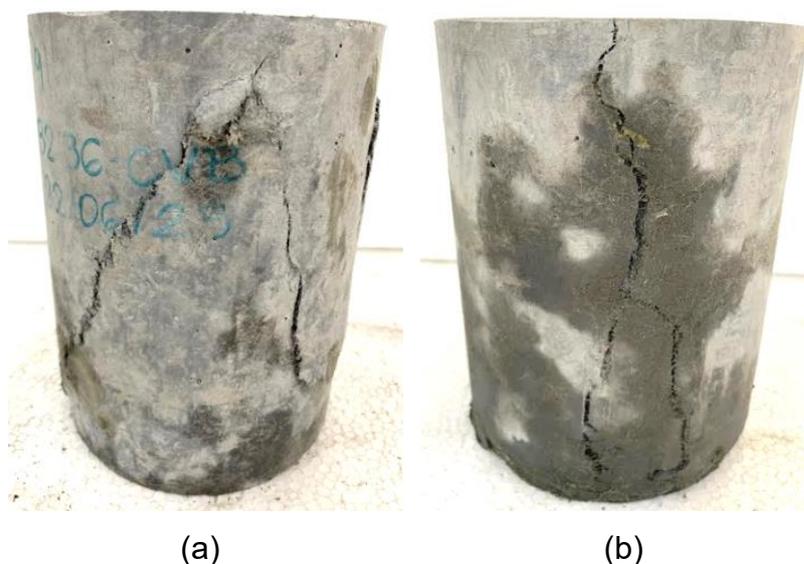


Figura 71 – Corpos de prova encamisados com SHCC (a) M2.4 e (b) M0.3 rompidos.

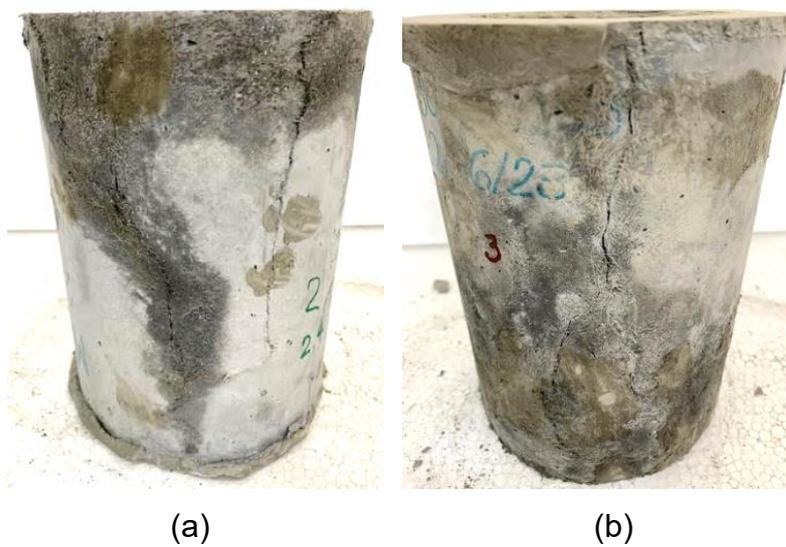


Figura 72 – Corpos de prova de SHCC vazados de (a) M2.4 e (b) M0.3 rompidos.

4 CONCLUSÕES

Os resultados deste estudo experimental demonstraram a viabilidade do desenvolvimento do compósito cimentício do tipo SHCC, utilizando areia de britagem com diferentes granulometrias e cinza volante residual e beneficiada, como reforço por meio do encamisamento de estruturas de concreto. Além disso, com base nos dados analisados, podem-se destacar as seguintes conclusões:

A matriz do compósito apresentou maiores valores de resistência à compressão axial, diametral e módulo de elasticidade, nas misturas com cinza volante beneficiada, independente da granulometria e do tipo de areia utilizada. Ao analisar a resistência à compressão axial da matriz com areia de britagem e areia natural, ambas com o mesmo tamanho máximo dos grãos (0,30 mm) e utilizando cinza volante beneficiada, os valores foram praticamente os mesmos. No entanto, destacam-se os benefícios ambientais resultantes da substituição da areia natural pela areia de britagem na mistura.

Houve também um aumento nos valores de tenacidade à fratura da matriz conforme aumentou a granulometria da areia e quando utilizada a cinza volante beneficiada nas misturas. No geral, obteve-se também uma maior energia de fratura ao aumentar o tamanho do grão da areia, pois, quando o tamanho do agregado aumenta, o caminho da fissura se torna mais complexo devido à presença de agregados maiores, resultando na necessidade de mais energia para propagar as fissuras.

Ao analisar os compósitos, pode-se observar que não ocorreu um aumento significativo da resistência à compressão conforme o aumento do tamanho do grão de areia, para as misturas com os dois tipos de cinza volante. Também é possível analisar que a resistência à compressão das amostras com o uso de areia de britagem alcançaram maiores valores do que as que foram moldadas com areia natural.

Conforme já esperado, foi observado que as misturas do compósito SHCC com cinza volante beneficiada obtiveram uma média de valores de resistência à compressão axial 60% maiores do que as misturas do compósito SHCC com cinza volante residual. A finura da cinza volante causa o aumento da sua atividade

pozolânica, tendo influência direta na resistência à compressão, contribuindo para uma matriz mais densa e com menor porosidade total.

Não houve variações significativas nos resultados do módulo de elasticidade do compósito SHCC, mas é possível observar que as misturas com cinza volante beneficiada possuem valores, em média, 11% maiores do que com cinza volante residual. O compósito SHCC analisado registrou também maiores valores durante o teste de compressão diametral nas misturas que contem cinza volante beneficiada.

Com relação aos resultados obtidos pelos compósitos do tipo SHCC quando submetidos a flexão, as misturas com cinza volante beneficiada apresentaram maiores valores de tensão de primeira fissura e tensão máxima, mas menores de deflexão de primeira fissura. Ou seja, quando submetidos a flexão, menor é a deformação ao atingir a primeira fissura nos compósitos com cinza volante beneficiada. Também foi observado que, no geral, quanto maior o tamanho do grão de areia, menores são os deslocamentos médios na flexão. Já a resistência à flexão e a capacidade de deformação sob flexão, diminuíram com o aumento dos grãos de areia, o que é atribuído ao aumento da tenacidade a fratura.

Já com relação aos resultados obtidos pelos compósitos do tipo SHCC quando submetidos à tração direta, foi possível verificar que todas misturas, apresentaram um comportamento de *strain hardening*, que é o comportamento de enrijecimento por deformação na tração direta, caracterizado pela capacidade de um material manter ou ganhar resistência pós-fissuração. E conforme aumenta o grão de areia, a capacidade de deformação à tração diminui para os dois tipos de cinza volante. No geral, o SHCC produzido com cinza volante beneficiada, quando submetido à tração direta, indicou ter menor capacidade de deformação.

Por fim, o reforço de SHCC empregado neste estudo demonstrou resultados satisfatórios de resistência, independentemente do nível de dano do núcleo de concreto analisado nesta pesquisa. Também foi possível observar que os corpos de prova reforçados por meio do encamisamento com compósito do tipo SHCC, após a execução do ensaio de compressão axial, exibiram uma ruptura dúctil, acompanhada pela formação de diversas microfissuras, indicando que o SHCC desenvolvido neste estudo desempenhou o seu papel. No entanto, são necessárias investigações mais abrangentes para validar essa hipótese.

Com isto, foi concluído que a substituição da areia natural por areia resíduo de britagem na composição do SHCC mostrou-se viável, mas deve-se ter cautela ao

utilizar o maior tamanho de grão de areia de britagem (M2.4). Ambas as cinzas volantes apresentam desempenho satisfatório. Sendo assim, ao empregar a areia de britagem com êxito em mais um produto na indústria da construção, há uma contribuição direta para diminuir os impactos ambientais gerados na obtenção da areia natural, assim como também é fornecida mais uma opção de utilização do resíduo do processo de britagem.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 5738: Concreto - Procedimento para moldagem e cura dos corpos de prova*. Rio de Janeiro, 2015. 13 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 5739: Concreto - Ensaio de compressão dos corpos de prova cilíndricos*. Rio de Janeiro, 2018. 13 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 5752: Materiais pozolânicos - determinação de atividade pozolânica com cimento Portland - índice de atividade pozolânica com cimento*. Rio de Janeiro, 2014. 8 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 6118: Projetos de estruturas de concreto*. Rio de Janeiro, 2023. 260 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 7211: Agregados para concreto - Requisitos*. Rio de Janeiro, 2022. 14 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 7215: Cimento Portland: Determinação da resistência à compressão*. Rio de Janeiro, 2019. 12 p.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 7681-2: Calda de cimento para injeção Parte 2: Determinação do índice de fluidez – Método de ensaio*. Rio de Janeiro, 2013. 4 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 8522-1: Concreto endurecido: Determinação dos módulos de elasticidade e de deformação. Parte 1: Módulos estáticos à compressão.* Rio de Janeiro, 2021. 24 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 9778: Argamassa e concreto endurecidos — Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica.* Rio de Janeiro. 2005. 8 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 9833: Concreto fresco - Determinação da massa específica, do rendimento e do teor de ar pelo método gravimétrico.* Rio de Janeiro, 2008. 11 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 12142: Concreto – Determinação da resistência à tração na flexão de corpos de prova prismáticos.* Rio de Janeiro, 2010. 9 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 11579: Cimento Portland Comum - Determinação do módulo de finura.* Rio de Janeiro, 2012. 8 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 12826: Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação do índice de finura por meio do peneirador aerodinâmico.* Rio de Janeiro, 2014. 9 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 13276: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos-Preparo da mistura e determinação do índice de consistência.* Rio de Janeiro, 2016. 6 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 13278: Argamassas para assentamento de paredes e revestimento de paredes e tetos – determinação da densidade de massa e do teor de ar incorporado.* Rio de Janeiro, 2005. 8 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 14656: Cimento Portland e matérias-primas – Análise química por espectrometria de raios X – Método de ensaio*. 2001. 21 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 16605: Cimento Portland e outros materiais em pó - Determinação da massa específica*. Rio de Janeiro, 2017. 8 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 16889: Concreto - Determinação da Consistência pelo abatimento do tronco de cone*. Rio de Janeiro, 2020. 9 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 16916: Agregado miúdo - Determinação da densidade e da absorção de água*. Rio de Janeiro, 2021. 11 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 17054: Agregados: Determinação da composição granulométrica – Método de ensaio*. Rio de Janeiro, 2022. 9 p.

ASOCIACIÓN MERCOSUR DE NORMALIZACIÓN. *NM 13: Cimento Portland: Análise química – Determinação do óxido de cálcio livre pelo etileno glicol*. Mercosul, 2013. 12 p.

ASOCIACIÓN MERCOSUR DE NORMALIZACIÓN. *NM 18: Cimento Portland: Análise química – Determinação de perda ao fogo*. Mercosul, 2012. 14 p.

ASOCIACIÓN MERCOSUR DE NORMALIZACIÓN. *NM22: Cimento Portland com adições de materiais pozzolânicos – Análise química – Método de arbitragem*. Mercosul, 2004. 24 p.

ASOCIACIÓN MERCOSUR DE NORMALIZACIÓN. *NM 53: Agregado graúdo: Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água*. Mercosul, 2009. 14 p.

ALI, M. A.; MAJUMDAR, A. J.; SINGH, B. **Properties of glass fibre cement - the effect of fibre length and content.** Journal of Materials Science, v. 10, n. 10, p. 1732–1740, 1975.

AL-GEMEEL, A. N. & ZHUGE, Y., **Using textile reinforced engineered cementitious composite for concrete columns confinement.** Composite Structures, v. 210, p. 695-706, 2019.

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.** Construction and Building Materials, v. 37, p. 518-525, 2012.

ANDRADE, A. **Tijolos de cinza volante e cal: estudo do desempenho quanto à resistência, absorção, durabilidade e aderência.** 1991. 150 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1991.

ANDRIOLO, F. **Usos e abusos do pó de pedra em diversos tipos de concreto.** In: Seminário: O uso da fração fina de britagem. São Paulo, EPUSP, 2005.

ANEPAC – ASSOCIAÇÃO NACIONAL DAS ENTIDADES DE PRODUTORES DE AGREGADOS PARA CONSTRUÇÃO. **Indústria Brasileira de Agregados.** São Paulo, Setembro, 2021.

ANEPAC – ASSOCIAÇÃO NACIONAL DAS ENTIDADES DE PRODUTORES DE AGREGADOS PARA CONSTRUÇÃO. **Mercado.** 2022. Disponível em: <https://anepac.org.br/mercado/#>. Acesso em: 10/09/2023.

ANEPAC – ASSOCIAÇÃO NACIONAL DAS ENTIDADES DE PRODUTORES DE AGREGADOS PARA CONSTRUÇÃO. **Revista Areia e Brita.** ano 22, 73 ed., 2018. Disponível em: <https://anepac.org.br/revistas/edicao-73-out-2018-a-jan-2019/>. Acesso em: 20/01/2024.

AOKI, J. (2009). **Areia natural ou artificial?** Cimento Itambé. Disponível em: <http://www.cimentoitambe.com.br/areia-natural-ou-artificial/>. Acesso em: 05 ago. 2023.

ARQUITÉ, G; GUIZOL, C.; LASSARTESE. **Presentation of a Quarrying Operation. In: Aggregates – geology, prospection, environment, testing specifications, extraction, processing plants, equipments and quality control.** Ed. Louis Primel and Claude Tourenq, p. 154 – 163, 2000.

ASTM E399. **Standard test method for linear-elastic plane-strain fracture toughness K_{Ic} of metallic materials**, 2013.

BARBOSA, M.; CARVALHO, C.; DELFINO, R.; ALVES, J.; ANDRADE, E.; DANTAS, M. **Produção de concreto de alto desempenho (CAD) com adição de pó de pedra.** Revista Interscientia, v. 7, n. 1, p. 200-217, 2019.

BARROS, D. **Estudos das propriedades mecânicas de misturas alternativas de ECC – Variação das características dos agregados.** 2023. 169 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2023.

BAYASI, B. Z.; ZENG, J. **Flexural behavior of slurry infiltrated mat concrete (SIMCON).** Journal of Materials in Civil Engineering, v. 9, n. 4, p. 194–199, 1997.

BERRY, E.; HEMMINGS, R.; LANGLEY, W.; CARETTE, G. **Beneficiated fly ash: hydration, microstructure, and strength development in Portland cement.** In: Proceedings of the First International Conference on Fly Ash, Silica Fume, Slag, and Natural Pozzolans in Concrete, SP-114, Detroit, USA, p. 241–73, 1989

BERTOLINO, L. C.; PALERMO, N.; BERTOLINO, A. V. **Manual de agregados para a construção civil-Geologia.** Ed. Adão da Luz e Salvador Almeida, 2ª ed., Cap. 4, Rio de Janeiro: CETEM/MCTI, 2012.

BETIOLI, A.; FORTUNATO, M.; MARTINS, B.; CASALI, J.; ROCHA, J.; COLLODETTI, G. **Efeito da composição granulométrica e da área superficial específica de**

resíduos de polimento de porcelanato em argamassas autoadensáveis. Tecnologia das Argamassas. Ambiente Construído. v. 20, n. 3, 2020.

BOUROTTE, C. L. M. **Rochas Ígneas.** Ambiente na Terra - Geologia. p. 193-212, 2017. Disponível em: https://midia.atp.usp.br/impessos/lic/modulo02/geologia_PLC0011/geologia_top09.pdf. Acesso em: 29/06/2023.

CALDAS, L.R.; TOLEDO, F.; ROMILDO, D. **Life cycle assessment of cementitious materials used in Brazil: study for the concrete block and 97 different mortars.** Latin American Journal on Life Cycle Assessment, v. 2, n. 2, p. 34-61, 2019.

CABRAL, K. **Influência da areia artificial oriunda da britagem de rocha granito-gnaise nas propriedades do concreto convencional no estado fresco e endurecido.** 2007. 341 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2007.

CALLISTER, W. D.; RETHWISCH, D. G. **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução.** 8ª ed., Ed. Grupo Gen-LTC, p. 817, 2013.

CARVALHO, H. D. S. **Análise de retração por secagem em argamassas autonivelantes utilizando adições minerais como substitutos parciais do cimento Portland.** 2015. 138 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2015.

CEZAR, B.; LUSTOSA, P.; MAGALHÃES, M. **Efeito da moagem da cinza volante nas propriedades mecânicas do concreto.** In: Congresso Brasileiro do Concreto, 61º, 2019, Fortaleza. Anais...Fortaleza: IBRACON, 2019.

CHANDRASEKHAR, C.; RANSINCHUNG, G. **Engineered cementitious composites (ECC) with manufactured sand (M-sand) for pavement applications.** Composites Communications, v. 41, 2023.

CHEN, B.; LIU, J. **Effect of Aggregate on the Fracture Behavior of High Strength Concrete.** Construction & Building Materials, v. 18, p. 585-590, 2004.

CHINDAPRASIRT, P.; HOMWUTTIWONG, S.; SIRIVIVATNANON, V. **Influence of fly ash fineness on strength, drying shrinkage and sulfate resistance of blended cement mortar**. Cement and Concrete Research, v. 34, n. 7, p. 1087-1092, 2004.

CHOI, S.J.; LEE, S.S.; MONTEIRO, P.J.M. **Effect of fly ash fineness on temperature rise, setting, and strength development of mortar**. Journal of Materials in Civil Engineering, v. 24, n. 5, p. 499-505, 2012.

COELHO, Y. C. D. M.; LUCAS, F. C. A.; SARMENTO, P. S. de M. **Environmental perception and mining of aggregates: The view of the urban-rural population of Ourém, Pará, Brazil**. Desenvolvimento e Meio Ambiente, v. 53, p. 38–60, 2020.

COSTA, A.; BARROS, J.; MOTTA, L.; VIANA, M.; SANTOS, R. **Viva a Terra! – Ciências Naturais**. Ed.Porto, p. 208, 2014.

CUCHIERATO, G. **Caracterização tecnológica de resíduos da mineração de agregados da região metropolitana de São Paulo (RMSP), visando seu aproveitamento econômico**. 2000. 232 f. Dissertação (Mestrado em Recursos Minerais e Hidrogeologia), Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000.

CYR, M.; LAWRENCE, P.; RINGOT, E. **Efficiency of mineral admixtures in mortars: quantification of the physical and chemical effects of fine admixtures in relation with compressive strength**. Cement and Concrete Research, v. 36, n. 2, p. 264-277, 2006.

DENG, H.; QIAN, S. **Utilization of local ingredients for the production of high-early-strength engineered cementitious composites**. Advances in Materials Science and Engineering, v. 2, p. 1-15, 2018.

DRAGO, C.; VERNEY, J.C.; PEREIRA, F. **Efeito da utilização de areia de britagem em concretos de cimento Portland**. Revista Escola de Minas. v. 62, n. 3, p. 399-408, 2009.

DRM-RJ, Departamento de Recursos Minerais do Estado do Rio de Janeiro. Secretaria de Estado de Desenvolvimento Econômico, Energia, Indústria e Serviços. **Panorama Mineral do Estado do Rio de Janeiro**. Rio de Janeiro, RJ, 2012. Disponível em: www.drm.rj.gov.br. Acesso em: 20 jun. 2023.

DULTRA, E.; CABALA, G.; JESUS, L.; SANTOS, L.; SOARES FILHO, M.; PEDROZA, A. **Influência da granulometria e formato de partículas de agregados miúdos originados da britagem de rochas em substituição à areia natural na confecção de matriz cimentícia**. In: Congresso Brasileiro do Concreto, 57º, 2015, Bonito-MS. Anais... Bonito: CBC, 2015.

FARES, G.; KHAN, M. I.; MOURAD, S.; ABBAS, W. **Evaluation of PVA and PBI-based engineered-cementitious composites under different environments**. Construction & Building Materials, p. 109-118, 2015.

FERREIRA JÚNIOR, A. V. **Fundamentos de Geologia e Petrografia**. Coleção Geografia, ed. UFPE, p. 383, 2021.

FERREIRA, G. E.; FONSECA JÚNIOR, C. A. F. **Manual de agregados para a construção civil - Mercado de Agregados**. Capítulo 2, p. 33-67, Ed. Salvador Luiz M., Adão Benvindo da Luz, Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2012.

FERREIRA, G. E.; PEREIRA, L. S. **Manual de agregados para a construção civil- Mercado de agregados no Brasil**. Ed. Adão da Luz e Salvador Almeida, 2ª ed., Cap. 1, Rio de Janeiro: CETEM/MCTI, 2009.

GÒIS, F. A. P. **Avaliação experimental do comportamento de concreto fluido reforçado com fibras de aço: Influencia do fator de forma e da fração volumétrica das fibras nas propriedades mecânicas do concreto**. 2010. 158 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade federal de Alagoas, Alagoas, 2010.

GONTIJO, M. **Controles ambientais em portos de areias**. Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento, ano 04, 2 ed., v. 3, p. 137-150, 2019.

GUACELLI, P.A.G. **Replacement of natural sand by crushed sand from balsatic rocks for coating mortars**. 2009. 164 f. Dissertation (Master in Building and Sanitation Engineering) – Center for Technology and Urbanism, State University of Londrina, Londrina-PR, 2009.

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**. Construction and Building Materials, v. 201, p. 461-472, 2019.

GUIMARÃES, C. C.; BASTOS, M. C. **Caracterização física e mecânica de concretos produzidos com substituição do agregado miúdo natural por resíduos de britagem**. Revista de Engenharia Civil. n. 22, p. 31-43, 2022.

HAN, X.; YANG, J.; FENG, J.; ZHOU, C.; WANG, X. **Research on hydration mechanism of ultrafine fly ash and cement composite**. Construction and Building Materials, v. 227, n. 10, 2019.

HEILBRON, M.; EIRADO, L.; ALMEIDA, J. **Geologia e recursos minerais do Estado do Rio de Janeiro – Texto explicativo dos mapas geológicos e de recursos minerais do Estado do Rio de Janeiro**. Ed. CPRM – Serviço Geológico do Brasil, Belo Horizonte, 2016.

HSU, S.; CHI, M.; HUANG, R. **Effect of fineness and replacement ratio of ground fly ash on properties of blended cement mortar**. Construction and Building Materials, v. 176, p. 250-258, 2018.

HUANG, B-T.; LI, Q-H.; XU, S-L. **Fatigue deformation model of plain and fiber-reinforced concrete based on weibull function**. Journal of Structural Engineering, v. 145, n. 1: 04018234, 2019.

HUANG, X.; RANADE, R.; LI, V.C. **Feasibility study of developing green ECC using iron ore tailings powder as cement replacement**. Journal of Materials in Civil Engineering, v. 25, n. 7, p. 923-931, 2013.

HUANG, T.; ZHANG, Y. X. **Mechanical properties of a PVA fiber reinforced engineered cementitious composites**. Sustainable Solutions in Structural Engineering and Construction, p. 439-444, 2014.

HUANG, B. WU, H. SHU, X. BURDETTE E.G. **Laboratory evaluation of permeability and strength of polymer-modified pervious concrete**. Construction and Building Materials, v. 24, n. 5, p. 818-823, 2009.

ISHIKAWA, P. H. **Utilização do resíduo de britagem de rocha e de pó de alumínio reciclado na produção de concreto celular**. FATECSP. São Paulo, 2014. Disponível em: <http://bt.fatecsp.br/system/articles/253/original/01.pdf>. Acesso em: 10/06/23.

JSCE - JAPAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS. **Recommendations for Design and Construction of High Performance Fiber Reinforced Cement Composites with Multiple Fine Cracks (HPFRCC)**. Concrete Engineering Series 82, 2008.

JUNXIA, L.; YANG, E.H. **Macroscopic and micro structural properties of engineered cementitious composites incorporating recycled concrete fines**. Cement and Concrete Composites, v. 78, p. 33-42, 2017.

KABELE, P., KANAKUBO, T. **Experimental and Numerical Investigation of Shear Behavior of PVA-ECC in Structural Elements**. In: Proceedings, Fifth International RILEM Workshop on High Performance Fiber Reinforced Cement Composites (HPFRCC 5), Reinhardt and Naaman, p. 137-146, 2007.

KAMADA, T.; LI, V. C. **Effects of surface preparation on the fracture behavior of ECC/concrete repair system**. Cement and Concrete Composites, v. 22, n. 6, p. 423–431, 2000.

KAMAL, A.; KUNIEDA, M.; UEDA, N. NAKAMURA, H. **Evaluation of crack opening performance of a repair material with strain hardening behavior**. Cement and Concrete Composites, v. 30, n. 10, p. 863–871, 2008.

KAN, L.; SHI, R.; ZHU, J. **Effect of fineness and calcium content of fly ash on the mechanical properties of Engineered Cementitious Composites (ECC)**. Construction and Building Materials, v. 209, p. 476-484, 2019.

KAWAMATA, A.; MIHASHI, H.; FUKUYAMA, H. **Properties of hybrid fiber reinforced cement-based composites**. Journal of Advanced Concrete Technology, v. 1, n. 3, p. 283-290, 2003.

KIATTIKOMOL, K.; JATURAPITAKKUL, C.; SONGPIRIYAKIJ, S.; CHUTUBTIM, S. **A study of ground coarse fly ashes with different finenesses from various sources as pozzolanic materials**. Cement and Concrete Composites, v. 23, p. 335-343, 2001.

KRISHNARAJ, L.; NIRANJAN, R.; KUMAR, G.P.; KUMAR, R.S. **Numerical and experimental investigation on mechanical and thermal behaviour of brick masonry: An efficient consumption of ultra-fine fly ash**. Construction and Building Materials, v. 253, Article 119232, 2020.

LAPA, R. P. **Metodologia de identificação de perigos e avaliação de riscos ocupacionais**. 2006. 141 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia), Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

LARAZ, F. **Caracterização da areia de sílica**. Dr. Fundação Sociedade Técnica, 2020. Disponível em: <https://www.doutorfundicao.com/post/caracteriza%C3%A7%C3%A3o-da-areia-de-s%C3%ADlica>. Acesso em: 28 jan. 2024.

LA SERNA, H. A.; REZENDE, M. M. (2019). **Agregados para a construção civil**. DNPM – Departamento Nacional de Produção Mineral, 2019. Disponível em: <http://www.dnpm.gov.br/dnpm/publicacoes/serie-estatisticas-e-economiamineral/outras-publicacoes-1/8-1-2013-agregados-minerais>. Acesso em: 08 agos. 2023.

LEPECH, M. D.; LI, V. C. **Long term durability performance of engineered cementitious composites**. Journal of restoration of buildings and monuments, v. 12, n. 2, p. 119-132, 2006.

LEPECH, M. D., LI, V. C.; ROBERTSON, R. E.; KEOLEIAN, G. A. **Design of green engineered cementitious composites for improved sustainability**. ACI Materials Journal, v. 105, n. 6, p. 567-575, 2008.

LI, V. C. **Advances in ECC research**. ACI Special Publication of Concrete: Material Scienceto Applications, p. 373-400, 2002.

LI, V. C. **Engineered cementitious composites (ECC) – material, structural, and durability performance**. E. Nawy, 1^a ed., Concrete Construction Engineering Handbook, CRC Press, 2007.

LI, V. C. **Engineered Cementitious Composites (ECC) – Material, Structural, and Durability Performance**. Concrete Construction Engineering Handbook, 2^a ed., p. 1–78, 2008.

LI, V. C. **Engineered Cementitious Composites (ECC)**. Springer Materials, v. 2019, p. 1-419, 2019.

LI, V. C. **From micromechanics to structural engineering - the design of cementitious composites for civil engineering application**, Structural Engineering Earthquake Engineering, v. 10, n. 2, p. 37–48, 1993.

LI, V. C. **On Engineered Cementitious Composites (ECC) A Review of the Material and Its Applications**. Journal of Advanced Concrete Technology, v. 1, n. 3, p. 215–230, 2003.

LI, V. C. **Tailoring ECC for Special Attributes: A Review**. International Journal of Concrete Structures and Materials, v. 6, n. 3, p. 135–144, 2012.

LI, V. C.; WANG, S.; WU, C. **Tensile strain-hardening behavior of polyvinyl alcohol engineered cementitious composite (PVA-ECC)** . ACI Materials Journal, v. 98, n. 6, p. 483-492, 2001.

LI, V. C.; LEUNG, C. K. Y. **Steady-state and multiple cracking of short random fiber composites**. Journal of Engineering Mechanics, v. 118, n. 11, p. 2246-2264, 1992.

LI, V. C.; WU, H-C. **Conditions for Pseudo Strain-Hardening in Fiber Reinforced Brittle Matrix Composites**. Mechanics Reviews, v. 45, n.8, p. 390-398, 1992.

LI, J.; YANG, E. **Macroscopic and microstructural properties of engineered cementitious composites incorporating recycled concrete fines**. Cement and Concrete Composites, v. 78, p. 33-42, 2017.

LI, V. C.; MISHRA, D. K. **Structural applications of engineered cementitious composites**. Indian Concrete Journal, v. 70, n. 10, p. 561–567, 1996.

LI, V. C.; MISHRA, D. K.; WU, H-C. **Matrix design for pseudo-strain-hardening fibre reinforced cementitious composites**. Materials and Structure, v. 28, p. 586-595, 1995.

LI, V. C.; WU, C.; WANG, S.; OGAWA, A.; SAITO, T. **Interface tailoring for strain-hardening polyvinyl alcohol-engineered cementitious composite (PVA-ECC)**. ACI Materials Journal, v. 99, n. 5, p. 463-472, 2002.

LOPES, O. R.; CARNEIRO, C. D. R. **O jogo “Ciclo das Rochas” para ensino de Geociências**. Revista Brasileira de Geociências, v. 39, p. 30-41, 2009.

LUZ, A. B. **Manual de agregados para a construção civil-Introdução**, Cap. 1, 2012.

LUZ, A. B.; ALMEIDA, S. L. M. **Manual de agregados para a construção civil-Materiais substitutivos (alternativos)**, Cap. 16, 2012.

LUZ, A. B.; LINS, F. A. **Introdução ao Tratamento de Minérios**. In: Tratamento de Minérios/CETEM, Adão B. Luz, João A. Sampaio e Silvia C. França (Editores), Capítulo 1, p. 3-20, Ed. CETEM, 2010.

LUZ, A. B.; SAMPAIO, J. A. **Manual de agregados para a construção civil – Operação de beneficiamento de rochas**. 2º Ed., Capítulo 9, p. 167-179, Ed. CETEM, 2012.

MA, H.; HERBERT, E.; OHNO, M.; LI, V. C. **Scale-linking model of self-healing and stiffness recovery in Engineered Cementitious Composites (ECC)**. Cement and Concrete Composites, v. 95 , p. 1-9, 2019.

MAALEJ, M.; QUEK, S. T.; ZHANG, J. **Behaviour of hybrid-fiber engineered cementitious composites subjected to dynamic tensile loading and projectile impact**. Journal Materials and Civil Engineering, v. 17, n. 2, p. 143-152, 2005.

MAALEJ, M.; QUEK, S. T.; AHMED, S. F. U.; ZHANG, J.; LIN, V. W. J.; LEONG, K. S. **Review of potential structural applications of hybrid fiber engineered cementitious composites**. Construction and Building Materials, v. 36, p. 216-227, 2012.

MADUREIRA, FILHO J. B.; ATENCIO, D.; MCREATH, I. **Minerais e rochas: constituintes da terra sólida**. In: Decifrando a terra. São Paulo: Oficina de Textos. p. 28-42, 2000.

MAGALHÃES, M. S. **Caracterização experimental de compósitos cimentícios reforçados com fibras de PVA: Processo de fratura, propriedades térmicas, deformações diferidas e estabilidade térmica**. 2010. 245 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil), Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2010.

MAGALHÃES, M. S.; TOLEDO FILHO, R. D.; FAIRBAIRN, E. M. R. **Physical and mechanical properties of strain-hardening cement-based composites (SHCC after exposure to elevated temperatures)**. In: Proceedings of the international conference on advance concrete materials, p. 203-208, Stellenbosch, 2009.

MAGALHÃES, M. S.; CEZAR, B. F.; LUSTOSA, P. R. **Influence of brazilian fly ash fineness on the cementing efficiency factor, compressive strength and Youn's modulus of concrete**. *Developments in the Built Environment*, v. 14, 2023.

MAI, Y. W.; COTTERELL, B. **Porosity and Mechanical Properties of Cement Mortar**. *Cement and Concrete Research*, v. 15, p. 995-1002, 1985.

MASSAZZA, F. **Pozzolana and pozzolanic cements**. *Lea's Chemistry of Cement and Concrete*, 4^a ed., p. 471-635, 2003.

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*, v. 141, p. 259-270, 2017.

MENOSI, R. T. **Utilização do pó de pedra basáltica em substituição à areia natural do concreto**. 2004. 110 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Ilha Solteira - SP, 2004.

MEHTA, P.K. **Influence of fly ash characteristics on the strength of portland-fly ash mixtures**. *Cement and Concrete Research*, v. 15, n. 4, p. 669-674, 1985.

METHA, K. P.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: estrutura, propriedades e materiais**. 1^o ed., Ed. PINI, São Paulo, 1994.

METHA, P. K.; MONTEIRO P.J. M. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais**. 2^o ed., Ed. IBRACON, São Paulo, 2014.

MOHAMMED, F. A.; MUPPARISETY, V. K. **Crushed stone dust as a replacement for river sand in self compacting repair mortars – A sustainable solution**. *Materials Today: Proceedings*. v. 52, p. 1168-1174, 2022.

NAAMAN, A. E. **Tensile strain-hardening FRC composites: Historical evolution since the 1960**. *Advances in Construction Materials*, p. 181–202, 2007.

NAAMAN, A. E.; REINHARDT, H. W. **Proposed classification of HPFRC composites based on their tensile response**. *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, v. 39, n. 289, p. 547–555, 2006.

NAAMAN, A. E.; SHAH, S. P. **Fracture and Multiple Cracking of Cementitious Composites**. 1ª ed. p. 228, Ed. ASTM Special Technical Publication, 1979.

NALLTHAMBI, P.; KARIHALOO, B.; HEATON, B. **Effect of Specimen and Crack Sizes, Water/Cement Ratio and Coarse Aggregate Texture upon Fracture Toughness of Concrete**. *Magazine of Concrete Research*, v. 36, n. 129, p. 227-236, 1984.

NEVILLE, A. M.. **Properties of concrete**. 5. ed. London: Pearson, 799 p., 2015.

NEVILLE, A. M.; BROOKS, J. J. **Tecnologia do concreto**. ed. Brookman, 2ª ed., p. 448, 2013.

NOGUEIRA, J. R. **Reciclando cinzas: estudo da viabilidade para produção de blocos para a construção civil a partir de cinza volante residual de um reator de leiteo fluidizado**. 2011. 169 f. Dissertação (Mestrado em Arquitetura, Urbanismo e Tecnologia), Instituto de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2011.

OLIVEIRA, W.; BAUTZ, R.; KIRMSE, R.; ALMEIDA, R.; RODRIGUES, R.; FONSECA, S.; GAVA, T.; GUERRA, V. **Rochas Sedimentares**. In: Congresso Brasileiro de Ciência do Solo, XXXIV, 2013, Florianópolis. Anais...Florianópolis: SBCS, 2013.

PAKRAVAN, H.; OZBAKKALOGLU, T. **Synthetic fibers for cementitious composites: A critical and in-depth review of recent advances**. *Construction and Building Materials*. v. 207, n. 74, p. 491-518, 2019.

PAUL, S.; ZIJL, G. VAN. **Assessment of fracture toughness in strain hardening cement-based composite (SHCC) made from fine and coarse sand**. *Research and*

Applications in Structural Engineering, Mechanics and Computation, p. 619–624, 2013.

PAYÁ, J.; MONZÓ, J.; PERIS-MORA, E.; BORRACHERO, M.V.; TERCERO, R.; PINILLOS, C. **Early-strength development of portland cement mortars containing air classified fly ashes**. Cement and Concrete Research, v. 25, n. 2, p. 449-45, 1995.

PEDROSO, D. E.; PEDROSO, C. L.; FILHO, J. R. S.; PRESA, M.; LIMA, E. P. **Concretos utilizando resíduo de corte de mármore e granito (RCMG) como substituição parcial do cimento Portland**. In: Congresso Brasileiro de Engenharia de Produção, VII, 2017, Ponta Grossa. Anais...Ponta Grossa: CONBREPRO, 2017.

PEDUI/RMRJ. **Plano Estratégico de Desenvolvimento Urbano Integrado da Região Metropolitana do Rio de Janeiro**. Rio de Janeiro, Junho, 2018. Disponível em: <https://www.modelarametropole.com.br/wp-content/uploads/2018/08/ResumoPT..compressed-1.pdf>. Acesso em: 10 ago. 2023.

PERÁCIO, L.H.R; DUARTE, F.F; FERREIRA, T.E.D; FERREIRA, E.E; ALEXANDRINO, J.S. **Simulação de um circuito de britagem para a produção de areia de britagem a partir de brita 0 (zero) gnáissica**. Brazilian Applied Science Review, p. 2295, 2018.

PERDIKARIS, P. C.; ROMEO, A. **Size Effect on Fracture Energy of Concrete and Stability Issues in Three-Point Bending Fracture Toughness Testing**. ACI Materials Journal, v. 92, n. 5, p. 483-496, 1995.

PERIS-MORA, E.; PAYA, J.; MONZO, J. **Influence of different sized fractions of a fly ash on workability of mortars**. Cement and Concrete Research, v. 23, p. 917-924, 1993.

PICCOLI, A. D.; ROCHA, J. C. R.; GHILARDI, R. P. **Desvendando as rocha e os minerais**. Revista Aprendendo a Ciência. v. 11, p. 22-26, 2022.

POLETTI, C. **A exploração de pedreiras na região metropolitana de São Paulo no contexto do planejamento e gestão do território**. 2006. 236 f. Tese (Doutorado em Geografia), Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

PRESS, F.; SIEVER, R.; GROTZINGER, J.; JORDAN, T. H. **Para Entender a Terra**. 4. ed., Ed. Porto Alegre: Bookman, 2008.

PRUDÊNCIO JR., L.R.; COELHO, A.H.; GUTSTEIN, D. **Metodologia para obtenção de agregado miúdo artificial a partir do processamento do pó-de-pedra**. In: Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído, XIII, 1995, Rio de Janeiro. Rio de Janeiro: Antac, 1995.

RAAS, K.; BHASKAR, M.C. **Pozzolanic activity of pul verised fuel ash**. Cement and Concrete Research, London, v. 5, n. 4, p. 363, 1975.

RANGEL, R.C. **Avaliação de compósitos cimentícios reforçados com fibras de PVA como camada superficial em estruturas sujeitas à erosão**. 2024. 157 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2023.

RODRIGUES, B. H.; MACHADO S. **Geologia regional e geomorfologia do Parque Nacional da Tijuca**. Museu Nacional, UFRJ, 2012. Disponível em: <https://portalclubedeengenharia.org.br/2012/11/27/geologia-regional-e-geomorfologia-do-parque-nacional-da-tijuca/>. Acesso em: 10 ago. 2023.

ROKUGO, K.; KUNIEDA, M.; LIM, S. C. **Patching repair with ECC on cracked concrete surface**. In: Conference on Construction Materials: Performance, Innovations and Structural Implications and Mindess Symposium, III, 2005, Vancouver. Anais...Vancouver: Univ. of British Columbia, 2005.

RUBIN, A. **Argamassas Autonivelantes Industrializadas para Contrapiso: Análise do desempenho físico-mecânico frente às argamassas dosadas em obra**. 2015.

205 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.

QUARESMA, L. F. **Produto 22 – Agregados para a Construção Civil**, Relatório Técnico 31-Perfil de areia para construção civil, MME/SGM, 33 p., Agosto, 2009.

SAHMARAN, M.; LACHEMI, M.; HOSSAIN, K.; RANADE, R.; LI, V. **Influence of aggregate type and size on ductility and mechanical properties of engineered cementitious composites**. ACI Materials Journal, v. 106, n. 3, p. 308-316, 2009.

SAHMARAN, M.; LI, V. **Engineered cementitious composites: an innovative concrete for durable structure**. In: Asce Structure Congress, Austin. Austin: American Society of Civil Engineers, p. 2219-2231, 2009.

SAHMARAN, M.; LI, V. **Engineered cementitious composites: can composites be accepted as crack-free concrete?** Transportation Research Record: Journal of the transportation research board, n. 2164, p. 1-8, 2010.

SALSA, J.; GUIMARÃES, O.; CUNHA, R. **Cientic 7 – Ciências Naturais**, Ed. Porto, 2017.

SANTANA, J. A. **Viabilidade do uso de resíduos de britagem em concretos de estruturas pré-fabricadas em Salvador**. 2008. 153 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental Urbana), Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2008.

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**. 2023. 170 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil – Área de Concentração Estruturas), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2023.

SANTOS, R. A.; LIRA, B. B.; RIBEIRO, A. C. M. **ARGAMASSA COM SUBSTITUIÇÃO DE AGREGADO NATURAL POR RESÍDUO DE BRITAGEM DE GRANITO**. Holos, Ano 28, v. 5, 2012.

SASMAL, S.; AVINASH, G. **Investigations on mechanical performance of cementitious composites micro-engineered with poly vinyl alcohol fibers.** Construction and Building Materials, v. 128, p. 136-147, 2016.

SCHMALFUSS, L. M., TIMM, J., PASSUELLO, A. C. B. **Relatório de coleta de dados para o Sistema de Informação do Desempenho Ambiental da Construção: minerais.** São Paulo: Sidac, 2022.

SCHRÖFL, C.; MECHTCHERINE, V.; KAESTNER, A.; VONTOBEL, P.; HOVIND, J.; LEHMAN, E. **Transport of water through Strain-hardening Cement-based Composite (SHCC) applied on top of cracked reinforced concrete slabs with and without hydrophobization of cracks - Investigation by neutron radiography.** Construction and Building Materials, v. 76, p. 70–86, 2015.

SCHWARTZ, M. M. **Composites materials handbook.** Ed. McGraw Hill, New York, 1984.

SHANMUGASUNDARAM, N.; PRAVEENKUMAR, 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, v. 309, 2021.

SHARMA, S.; VYAS, A. K. **A study on use of granite powder and crusher dust as fine aggregate in cement mortar.** Materials Today: Proceedings, v. 93, part. 3, p. 176-181, 2023.

SHOJI, D.; HE, Z.; ZHANG, D.; LI, V. **The greening of engineered cementitious composites (ECC): A review.** Construction and Building Materials. v. 327, 2022.

SILVA, J. A. **A mineração de brita na região metropolitana do Rio de Janeiro.** 2005. 146 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral), Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2005.

SILVA, M. G. **Cimentos Portland com adições minerais**. In: ISAIA, G. C., Ed. *Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais*. São Paulo: Ibracon, v. 1, p. 791-823, 2010.

SILVA, J. P. M. **Manual de agregados para a construção civil - Agregados e Sustentabilidade**, 2º Ed., Cap. 13, p. 237-255, Ed. CETEM, 2012.

SLANICKA, S. **The influence of fly ash fineness on the strength of concrete**. *Cement and Concrete Research*, v. 21, p. 285-296, 1991.

SOARES, L.; FUJIMURA, F.; BLASQUES JUNIOR, M.; RACHEL, R.M.; BRAGA, J.M. **Natural sands: material increasingly scarce construction in the Metropolitan Region of Greater São Paulo**. In: *International Congress of Metallurgical Technology and Materials, II*, 1997, São Paulo. *Anais...* São Paulo: ABM, 1997.

SOROUSHIAN, P.; NAGI, M.; HSU, J. **Optimization of the Use of Lightweight Aggregates in Carbon Fiber Reinforced Cement**. *ACI Materials Journal*, v. 89, n. 3, May-June, p. 267-276, 1992.

SUN, Y.; LEE, H. **Research on properties evolution of ultrafine fly ash and cement composite**. *Construction and Building Materials*, v. 261, Article 119935, 2020.

TERMKHAJORNKIT, P.; NAWA, T.; YAMASHIRO, Y., *et al.* **Self-healing ability of fly ash–cement systems**. *Cement and Concrete Composites*, v. 31, p. 195-203, 2009.

TERRA, L. E. M. **Finos de pedra para confecção de concreto estrutural – práticas recomendadas**. In: *Seminário Desenvolvimento Sustentável e a Reciclagem na Construção Civil: Práticas Recomendadas, III*, p. 65-71, 2000, São Paulo. *Anais...*São Paulo: IBRACON, 2000.

TIECHER, F.; MARCON, E. **Estudo da produção de argamassas de revestimento contendo areia de britagem**. In: *Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído, XVIII*, 2020, Porto Alegre. *Anais...* Porto Alegre: Antac, 2020.

TINOCO, M. P. **Comportamento mecânico de compósitos cimentícios do tipo SHCC utilizando reforços híbridos**. 2020. 178 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro - PUC, Rio de Janeiro, 2020.

TOSUNFELEKOGLU, K.; GODEK, E.; KESKINATES, M., *et al.* **Utilization and selection of proper fly ash in cost effective green HTPP-ECC design**. J. Clean. Prod., v. 149, p. 557-568, 2017.

UNO – Environment Programme. **Sand and Sustainability: 10 strategic recommendations to avert a crisis**. Ed. GRID, Geneva, 2022.

USP – Universidade de São Paulo. **Geociências**, 2023. Disponível em: <https://didatico.igc.usp.br/rochas/metamorficas/gnaisse/>. Acesso em: 10/09/2023.

VALERIANO, *et al.* **Geologia e recursos minerais da folha da Baía de Guanabara**. Serviço Geológico do Brasil, Ed. CPRM, 2012.

VALVERDE, F. M. **Agregados para construção civil**. In: Balanço Mineral Brasileiro, 2001. Disponível em: <https://www.gov.br/anm/pt-br/centrais-de-conteudo/dnpm/publicacoes-economia-mineral/arquivos/agregados-para-contrucao-civil.pdf>. Acesso em: 11/09/2023.

VALVERDE, F. M. **Demanda por agregados para construção**. Comin, Fiesp, ANEPAC, 2018. Disponível em: <https://sitefiespstorage.blob.core.windows.net/observatoriodaconstrucao/2018/10/Demanda-por-Agregados-para-construcao.pdf>. Acesso em: 11/09/2023.

VAN ZIJL, G. ; SLOWIK, V.; TOLEDO FILHO, R. D.; WITTMAN, F. H.; MIHASHI, H. **Comparative testing of crack formation in strain-hardening cement-based composites (SHCC)**. Materials and Structures/Materiaux et Constructions, v. 49, n. 4, p. 1175–1189, 2016.

VITAL, P. O.; MAGALHÃES, M. S.. **Efeito do teor e finura da cinza volante em compósitos cimentícios de alto desempenho**. 4º Congresso Luso-Brasileiro de Materiais de Construção Sustentáveis. Salvador, Brasil. p. 359-368, 2022.

WANG, S.; LI, V. C. **Tailoring of pre-existing flaws in ECC matrix for saturated strain hardening**. in: Proceedings of FRAMCOS-52004, Vail, Colorado, USA, p. 1005–1012, 2004.

WANG, S. X.; LI, V. C. **Engineered cementitious composites with high-volume fly ash**. ACI Materials Journal, v. 104, n. 3, p. 233-241, 2007.

WANG, S.; LI, V. C. **Polyvinyl alcohol fiber reinforced engineered cementitious composites: Material design and performances**. Proc Intl Workshop on Hprfcc Structural Applications, p. 65-73, 2011.

WINGE, M. **Petrologia metamórfica - Notas de aula**. Publicado na Internet. Universidade de Brasília, Instituto de Geociências, 1996. Disponível em: <https://mw.eco.br/ig/cursos/met1/index.htm>. Acesso em: 20/09/2023.

WILLE, K.; EL-TAWIL, S.; NAAMAN, A. E. **Properties of strain hardening ultra high performance fiber reinforced concrete (UHP-FRC) under direct tensile loading**. Cement and Concrete Composites, v. 48, p. 53-66, 2014.

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**, International Journal of Fracture, v. 98, n. 2, 151–177, 1999.

YANG, E.; YANG, Y.; LI, V. C. **Use of high volumes of fly ash to improve ECC mechanical properties and material greenness**. ACI Materials Journal, v. 104, n. 6, p. 620-628, 2007.

YANG, Y.; LEPECH, M. D.; YANG, E-H.; LI, V. C. **Autogenous healing of engineered cementitious composites under wet-dry cycles**. Cement and Concrete Research, v. 39, n. 5, p. 382–390, 2009.

YU, J.; LI, G.; LEUNG, C. K. Y. **Hydration and physical characteristics of ultrahigh-volume fly ash-cement systems with low water/binder ratio**. Construction and Building Materials, p. 509-518, 2018.

ZANCHETA, L. M.; SOARES, L. **Uso de areias resultantes da britagem de rocha na elaboração de argamassas**. Seminário de desenvolvimento sustentável e a reciclagem na construção civil. Práticas recomendadas III. IBRACON. Comitê técnico 206, Meio ambiente. São Paulo, p. 127-291, 2000.

ZHANG, J.; LEUNG, C. K. Y.; CHEUNG, Y. N. **Flexural performance of layered ECC-concrete composite beam**. Composites Science and Technology, v. 66, n. 11–12, p. 1501–1512, 2006.

ZHOU, J.; QIAN, S.; BREUGEL, K.V. **Engineered cementitious composites with low volume of cementitious materials**. Fracture mechanics of concrete and concrete structures: Proceedings of FraMCoS-7, May, p. 1551- 1556, 2010.

ZHOU, Y.; XI, B.; SUI, L.; ZHENG, S.; XING, F.; LI, L. **Development of high strain-hardening lightweight engineered cementitious composites: Design and performance**. Cement and concrete composites, v. 104, 2019.