



Universidade do Estado do Rio de Janeiro

Centro de Tecnologia e Ciências

Faculdade de Engenharia

Rhuan Cardoso Rangel

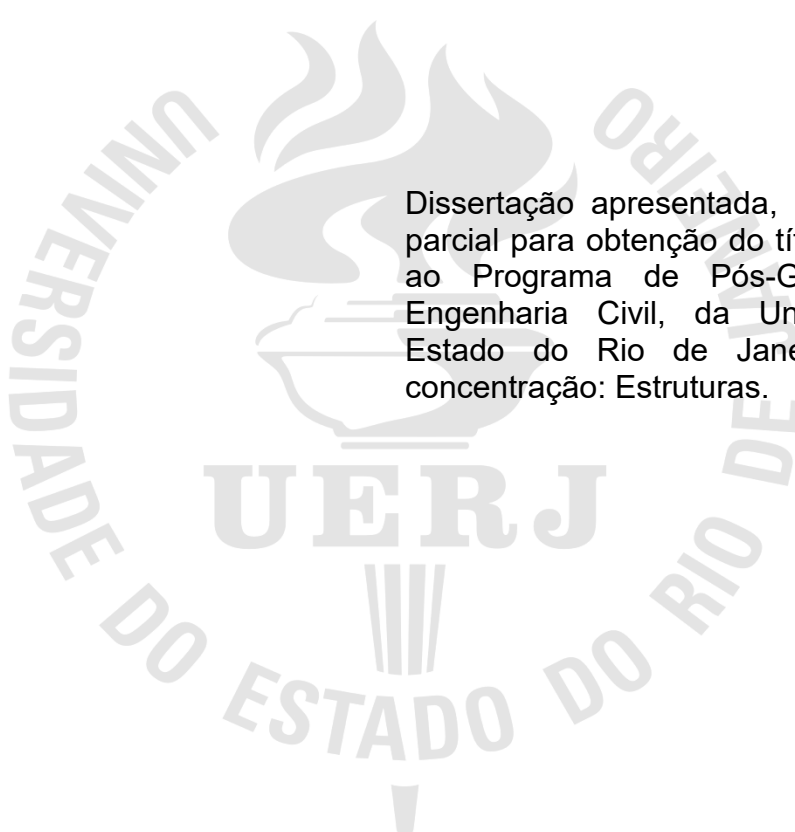
**Avaliação do uso de blendas de cinza volante e metacaulinita nas
propriedades físicas, mecânicas e desgaste por erosão de
compósitos cimentícios do tipo *strain hardening***

Rio de Janeiro

2023

Rhuan Cardoso Rangel

Avaliação do uso de blendas de cinza volante e metacaulinita nas propriedades físicas, mecânicas e desgaste por erosão de compósitos cimentícios do tipo *strain hardening*



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: Profa. Dra. Margareth da Silva Magalhães

Rio de Janeiro

2023

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

R196 Rangel, Rhuan Cardoso.

Avaliação do uso de blendas de cinza volante e metacaulinita nas propriedades físicas, mecânicas e desgaste por erosão de compósitos cimentícios do tipo strain hardening / Rhuan Cardoso Rangel. – 2023.
155 f.

Orientadora: Margareth da Silva Magalhães.

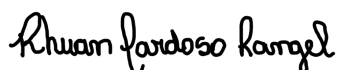
Dissertação (Mestrado) – Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Faculdade de Engenharia.

1. Engenharia civil - Teses. 2. Cimento - Teses. 3. Erosão - Teses. 4. Concreto - Aditivos - Teses. 5. Resistência de materiais - Teses. I. Magalhães, Margareth da Silva. II. Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Faculdade de Engenharia. III. Título.

CDU 691.54:620.17

Bibliotecária: Júlia Vieira – CRB7/6022

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



Assinatura

06/05/2024

Data

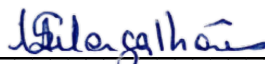
Rhuan Cardoso Rangel

Avaliação do uso de blendas de cinza volante e metacaulinita nas propriedades físicas, mecânicas e desgaste por erosão de compósitos cimentícios do tipo *strain hardening*.

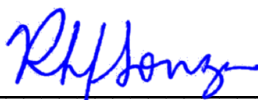
Dissertação apresentada, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre, ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de concentração: Estruturas.

Aprovado em: 13 de dezembro de 2023.

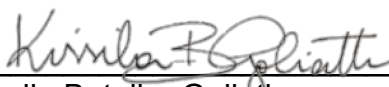
Banca Examinadora:



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



Profa. Dra. Regina Helena Ferreira de Souza
Faculdade de Engenharia – UERJ



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



Prof. Dr. Paulo Roberto Lopes Lima
Universidade Estadual de Feira de Santana – UEFS

Rio de Janeiro

2023

DEDICATÓRIA

A Deus porque em todos os meus momentos de fragilidade foi Sua voz que eu ouvia me encorajando a continuar.

AGRADECIMENTOS

A Deus por ser meu suporte em todos os momentos, acreditar na Sua existência é o que me mantém vivo.

À minha mãe Patrícia e meu pai José Carlos por sempre acreditarem em mim, pelo suporte em diversos momentos e por terem me ensinado qual é o caminho certo a seguir para honrá-los.

À minha irmã Isabella porque em diversos momentos foi ela quem trouxe descanso para minha mente cansada.

Ao meu companheiro Christopher por sempre me incentivar, me ouvir e me encorajar a abraçar as conquistas que acredito serem ideias para mim.

À minha filha de quatro patas Mel que foi o melhor presente que recebi na minha vida, ela foi a cura para todas as feridas que existiam em mim e foi capaz de me acalmar e de me entender de maneiras que nenhum outro ser humano seria capaz.

Aos meus avós Zenaide e Jorge, por terem sido os melhores avós que eu poderia ter, obrigado por terem me escolhido.

À minha orientadora Profa. Dra. Margareth Da Silva Magalhães por toda ajuda e dedicação, por despertar em mim a vontade de me capacitar sempre mais e por servir de referência para que eu busque ser um ótimo profissional.

À amiga que a UERJ me deu, Vivianne, por tanto cuidado e carinho comigo, por se dispor a me ajudar, por estar presente em todas as etapas da minha pesquisa, por me ensinar e me fortalecer em diversos momentos.

Aos técnicos do laboratório Danilo, André e Flávio, por terem sido tão pacientes e parceiros nessa jornada, me ensinaram muito a respeito da vivência de ensaios e funcionamento de um laboratório.

À UERJ por ser uma universidade que visa o melhor para seus alunos e aos professores que dela fazem parte, por tanto ensinamento.

Aos amigos que, direta ou indiretamente, foram essenciais nessa conquista. Thais, Mayara, Danielle, Max, Daniel foi ótimo dividir esse momento de aprendizado com vocês.

E por último, e não menos importante, um agradecimento especial a mim por acreditar nos meus sonhos e lutar para realizá-los.

Me movo como educador, porque, primeiro, me movo como gente.

Paulo Freire

RESUMO

RANGEL, Rhuan Cardoso. *Avaliação do uso de blendas de cinza volante e metacaulinita nas propriedades físicas, mecânicas e desgaste por erosão de compósitos cimentícios do tipo strain hardening*. 2023. 155 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2023.

O processo de erosão tem grande influência na perda de vida útil e destruição das construções. A utilização de compósitos cimentícios como camada de reparo superficial pode apresentar melhora nas características de resistência ao desgaste. Com o objetivo de analisar o impacto de blendas de cinza volante e metacaulinita, no desempenho de compósitos cimentícios reforçados com fibras de PVA, foram produzidas 6 misturas com diferentes teores de cinza volante e metacaulinita, ou seja 0% + 50% (MC50), 10% + 40% (MC40CV10), 20% + 30% (MC30CV20), 30% + 20% (MC20CV30) e 40% + 10% (MC10CV40) e 50% + 0% (CV50). Nestas misturas o teor de cimento em relação ao material cimentício (em massa) é fixado em 50%. Além disso, foram produzidas outras duas misturas de referência (CV1 e CV2), com somente cinza volante, como material cimentício suplementar, e diferentes teores de água/material cimentício. A proporção em massa de cinza volante/material cimentício nestas duas misturas foi de 55%. Os resultados dos ensaios na matriz indicam que a mistura com 10% de cinza volante e 40% de metacaulinita, MC40CV10, apresentou menor porosidade e aumento da massa específica, resistência à compressão e tenacidade, destacando sua maior capacidade de absorver energia antes de fraturar. Os resultados dos ensaios nos compósitos também demonstraram que a mistura MC40CV10 apresentou maior massa específica, resistência à compressão e módulo de elasticidade. Por outro lado, a mistura CV50, embora mantendo uma resistência à compressão significativa, se distingue por sua mais elevada capacidade de deformação na flexão e tração direta. Vale ressaltar que todos os compósitos produzidos apresentaram um comportamento de strain hardening quando submetidos a esforços de tração direta, com capacidade de deformação entre 1,5% e 2,9% e resistência pós-fissuração entre 3,6 MPa e 5,6 MPa. Na flexão, os compósitos também apresentaram elevada capacidade de deflexão (entre 10,8mm e 26,9mm) e tensão máxima pós-fissuração entre 7,8 e 9 MPa. No desgaste por erosão os compósitos CV50, MC10CV40 e MC50 apresentaram os menores desgastes por erosão, após 72 h de ensaios. Já os desgastes iniciais, após 12h de ensaios, foram menores nas misturas MC50 e MC40CV10, que também apresentaram elevados valores de dureza superficial. Vale ressaltar que a camada de reparo com 2,5 cm de espessura não foi suficiente, uma vez que o desgaste atingiu a superfície do concreto em pontos distintos após 48h de ensaios. Os resultados também indicam que a redução do teor de água nas misturas, com somente cinza volante, foi benéfica para a redução da porosidade, aumento da resistência à compressão e da resistência à erosão.

Palavras-chave: Compósitos cimentícios reforçados com fibras; SHCC; Erosão; Cinza volante; Metacaulinita.

ABSTRACT

RANGEL, Rhuan Cardoso. *Evaluation of using fly ash and metakaolin blends on the physical, mechanical and erosion wear properties of strain hardening cementitious composites*. 2023. 155 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2023.

The erosion process has a significant influence on the loss of lifespan and destruction of buildings. The use of fiber reinforced cementitious composites, as concrete repair can improve superficial wear strength. With the aim of analyzing the impact of fly ash and metakaolin blends on the performance of PVA fiber-reinforced cementitious composites, six mixtures with blend of fly ash (FA) and metakaolin (MC) were produced. The mixtures had 0% FA + 50% MC (MC50), 10%FA + 40% MC (MC40CV10), 20% FA + 30% MC (MC30CV20), 30% FA + 20% MC (MC20CV30), 40% FA + 10% MC (MC10CV40), and 50% FA + 0% MC (CV50). In all mixtures, the cement content relative to the cementitious material (by mass) was fixed at 50%. Additionally, two others mixtures (CV1 and CV2) were produced, with only fly ash as supplementary cementitious material, and different water-to-cementitious material ratios. In CV1 and CV2 mixtures, the fly ash to cementitious material ratio was 55%. The results of the experimental tests on the composite matrix indicate that the mixture with 50%metakaolin (MC50%) and 10% fly ash and 40% metakaolin (MC40CV10), showed highest compression strength and toughness, highlighting its greater capacity to absorb energy before fracturing. The results of the composites tests also demonstrated that the MC40CV10 mixture exhibited higher density, compression strength, and modulus of elasticity. On the other hand, the CV50 mixture, although maintaining significant compression strength, showed higher strain and deflection capacity under bending and direct tension. It is worth noting that all composites exhibited strain-hardening behavior when subjected to direct tension, with strain capacities between 1.5% and 2.9% and tensile strengths between 3.6 MPa and 5.6 MPa. Under bending loads, the composites also showed high deflection capacities (between 10.8 mm and 26.9 mm) and flexural strengths between 7.8 and 9 MPa. Under erosion wear, the CV50, MC10CV40, and MC50 composites exhibited the lowest erosion wear after 72 hours of testing. However, initial wear, after 12 hours of testing, was lower on the MC50 and MC40CV10 mixtures, which also showed more elevated surface hardness. In addition, 2.5 cm thick repair layer was not sufficient, because the wear reached the concrete surface at distinct points, after 48 hours of testing. The results also indicate that reducing the water content in composite was beneficial to reduce porosity, increasing compressive strength and erosive wear strength.

Keywords: Fiber-reinforced cementitious composites; SHCC; Erosion; Fly ash; Metakaolin.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Abrasão entre dois e três corpos de prova (RIJEZA METALURGIA, online) ¹	26
Figura 2 - Processo de perda de material por abrasão com formação de poeira em superfície de concreto (KAZMIERCZAK, 2011).	28
Figura 3 - Influência da (a) relação a/c e do (b) tipo de agregado na resistência à abrasão de concretos (KAZMIERCZAK, 2011).	29
Figura 4 - Representação esquemática do comportamento de um concreto sem reforço e de dois compósitos reforçados com fibras sob cargas de tração: a) tração de corpos de prova b) curva tensão vs deformação (Adaptado de MEHTA e MONTEIRO, 2014).	38
Figura 5 - Endurecimento por deformação do SHCC (LI, 2019).....	40
Figura 6 - Tabuleiro da ponte Mihara, em Hokkaido, utilizando-se aço e SHCC (LI, 2004).	41
Figura 7 - Reparo do tabuleiro de uma ponte em Michigan, Estados Unidos, utilizando- se SHCC (LI, 2004).	42
Figura 8 - (a) Preparo do SHCC no local (b) Preparação da superfície da barragem (c) Aplicação do SHCC pulverizado e (d) barragem após reparo (LI, 2019).	42
Figura 9 - Desenvolvimento da resistência à compressão do SHCC de acordo com a idade (LI, 2019).	51
Figura 10 - Relação entre a resistência à compressão e capacidade de deformação de diferentes tipos de SHCC (Adaptado de ZHU <i>et al.</i> , 2022).	52
Figura 11 - Comportamento tensão vs. deflexão de vigas PVA-SHCC em duas idades diferentes (LI, 2019).	54
Figura 12 - Típica curva tensão-deformação de SHCC (Adaptado de LI, 2019).	55
Figura 13 – Esquema dos ensaios realizados nos compósitos e conjuntos reparados.	60
Figura 14 – Esquema dos ensaios realizados nas matrizes dos compósitos.....	60
Figura 15 - Curva granulométrica do agregado miúdo.	62
Figura 16 - Curva granulométrica do agregado graúdo.....	63
Figura 17 - Curva granulométrica da areia natural.	66

Figura 18 - Gráfico tempo de escoamento versus teor de superplastificante (SP) das pastas fabricadas com (a) cimento e cinza volante e (b) cimento e metacaulinita. ...	67
Figura 19 – Representação do molde utilizado para moldar o substrato de concreto empregado nos ensaios de erosão.	69
Figura 20 – Moldagem do substrato de concreto com o isopor no fundo da forma...	70
Figura 21 – Materiais após processo de mistura na argamassadeira.	73
Figura 22 – Formas para moldagem dos ensaios de (a) compressão, (b) flexão e (c) tração direta.	73
Figura 23 – Moldagem de compósitos para ensaio de erosão.	74
Figura 24 – Processo de cura dos compósitos.....	75
Figura 25 – Conjunto reparado (substrato de concreto + reforço de compósito) após desmoldagem.....	76
Figura 26 – Ensaio de abatimento do concreto.	78
Figura 27 – Ensaio de resistência à compressão axial do concreto.....	80
Figura 28 – Ensaio de consistência do compósito e da matriz do compósito.....	82
Figura 29 – Ensaio de massa específica do compósito.	83
Figura 30 – Ensaio de compressão axial nos compósitos.....	85
Figura 31 – Configuração de tenacidade à fratura da matriz dos compósitos.....	86
Figura 32 – Configuração de flexão dos compósitos.....	87
Figura 33 – Configuração de compressão diametral da matriz dos compósitos.	88
Figura 34 - Amostra utilizada no ensaio de tração direta (todas as dimensões em milímetros).....	89
Figura 35 – Configuração de tração direta dos compósitos.	90
Figura 36 - Esclerômetro Digital utilizado no ensaio para determinação do índice esclerométrico.	91
Figura 37 – Demonstração das marcações feitas na face do corpo de prova cúbico (em cm) utilizado no ensaio de dureza superficial.....	91
Figura 38 – Corpo de prova cúbico preparado para receber os golpes do esclerômetro.	93
Figura 39 – a) Equipamento utilizado para o ensaio de abrasão em água e b) corpo de prova no interior do equipamento e em sua superfície as esferas que provocam erosão.	95

Figura 40 – Relação do teor de cinza volante com as propriedades físicas de (a) porosidade, (b) absorção de água e (c) massa específica da matriz no estado endurecido.....	100
Figura 41 - Relação do teor de cinza volante com as propriedades de (a) compressão axial e (b) módulo de elasticidade da matriz.	102
Figura 42 – Modo de ruptura da matriz quando exposta a força de compressão. ..	103
Figura 43 - Relação do teor de cinza volante com compressão diametral da matriz.	104
Figura 44 – Corpos de prova após exposição à carga de compressão diametral. ...	105
Figura 45 – Relação do teor de cinza volante com as propriedades de (a) tenacidade à fratura e (b) energia de fratura da matriz.....	106
Figura 46 - Relação entre resistência à compressão (f_c) e tenacidade à fratura (K_m) das argamassas.	107
Figura 47 – Corpo de prova após a ruptura no ensaio de tenacidade.....	107
Figura 48 - Relação do teor de cinza volante com as propriedades físicas de (a) porosidade, (b) absorção de água e (c) massa específica dos compósitos no estado endurecido.....	110
Figura 49 – Curvas tensão vs. deformação das misturas (a) MC50 e (b) MC40CV10 sob carga de compressão axial.....	111
Figura 50 - Curvas tensão vs. deformação das misturas (a) MC30CV20 e (b) MC20CV30 sob carga de compressão axial.	111
Figura 51 - Curvas tensão vs. deformação das misturas (a) MC10CV40 e (b) CV50 sob carga de compressão axial.....	112
Figura 52 - Curvas tensão vs. deformação das misturas (a) CV1 e (b) CV2 sob carga de compressão axial.	112
Figura 53 - Relação do teor de cinza volante com (a) resistência à compressão, (b) Módulo de Elasticidade e (c) deformação de pico dos compósitos.	113
Figura 54 – Corpos de prova após exposição à carga de compressão axial.	114
Figura 55 – Curvas de tensão vs. deflexão das misturas (a) MC50 e (b) MC40CV10 sob carga de flexão.	115
Figura 56 - Curvas de tensão vs. deflexão das misturas (a) MC30CV20 e (b) MC20CV30 sob carga de flexão.	115
Figura 57 – Curvas de tensão vs. deflexão das misturas (a) MC10CV40 e (b) CV50 sob carga de flexão.	116

Figura 58 – Curvas de tensão vs. deflexão das misturas (a) CV1CV1 e (b) CV2CV2 sob carga de flexão.	116
Figura 59 - Relação do teor de cinza volante na mistura com a (a) tensão de primeira fissura, (b) deflexão de primeira fissura, (c) tensão máxima e (d) deflexão na ruptura dos compósitos.	117
Figura 60 – Configuração de corpos de prova após ação de carga de flexão.	119
Figura 61 - Corpos de prova das misturas (a) MC50, (b) MC40CV10, (c) MC30CV20, (d) MC20CV30, (e) MC10CV40, (f) CV50, (g) CV1 e (h) CV2 após ensaios de carga de flexão.....	120
Figura 62 – Relação entre (a) tenacidade à fratura (k_m) das argamassas e deflexão de ruptura dos compósitos e (b) energia de fratura (J_{tip}) das argamassas e deflexão de ruptura dos compósitos.	121
Figura 63 – Curvas tensão vs. deformação das misturas (a) MC50 e (b) MC40CV10 sob carga de tração direta.....	122
Figura 64 - Curvas tensão vs. deformação das misturas (a) MC30CV20 e (b) MC20CV30 sob carga de tração direta.	122
Figura 65 - Curvas tensão vs. deformação das misturas (a) MC10CV40 e (b) CV50 sob carga de tração direta.....	123
Figura 66 - Curvas tensão vs. deformação das misturas (a) CV1 e (b) CV2 sob carga de tração direta.	123
Figura 67 - Relação do teor de cinza volante com (a) tensão de primeira fissura, (b) deformação de primeira fissura, (c) tensão máxima, (d) deformação e (e) Módulo de Elasticidade dos compósitos.	125
Figura 68 – Modo de ruptura e as fissuras dos corpos de prova das misturas (a) MC50, (b) MC40CV10, (c) MC30CV20, (d) MC20CV30, (e) MC10CV40, (f) CV50, (g) CV1 e (h) CV2 após serem expostos a carga de tração direta.	127
Figura 69 – Fissuras aparentes no corpo de prova após ensaio de tração direta. ...	128
Figura 70 – Curvas do tempo de ensaio vs. desgaste volumétrico das misturas (a) MC50 e (b) MC40CV10.....	131
Figura 71 - Curvas do tempo de ensaio vs. desgaste volumétrico das misturas (a) MC30CV20 e (b) MC20CV30.	131
Figura 72 - Curvas do tempo de ensaio vs. desgaste volumétrico das misturas (a) MC10CV40 e (b) CV50.	131

Figura 73 - Curvas do tempo de ensaio vs. desgaste volumétrico das misturas (a) CV1 e (b) CV2.....	132
Figura 74 - Correlação entre a dureza superficial e o desgaste por erosão dos compósitos.	133
Figura 75 - Correlação entre o módulo de elasticidade e o desgaste por erosão dos compósitos.	133
Figura 76 – Curva tempo de ensaio vs. desgaste volumétrico médio dos compósitos.	134
Figura 77 – Configuração dos conjuntos reparados das misturas (a) MC50, (b) MC40CV10, (c) MC30CV20, (d) MC20CV30, (e) MC10CV40 e (f) CV50 após expostos a ensaio de erosão.....	135
Figura 78 – Configuração dos compósitos das misturas (a) CV1 e (b) CV2 após expostos a ensaio de erosão.....	136

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Óxidos presentes no cimento. (SANTANA e MAGALHÃES, 2022).....	61
Tabela 2 - Composição química da cinza volante (VITAL e MAGALHÃES, 2022)....	64
Tabela 3 – Composição química da metacaulinita.	65
Tabela 4 – Propriedades da fibra de PVA.	68
Tabela 5 – Quantidade de materiais utilizados na moldagem do concreto.	68
Tabela 6 - Proporções de materiais dos compósitos.....	71
Tabela 7 - Quantidade de materiais utilizados na moldagem dos compósitos (kg/m³).	72
Tabela 8 – Quantidade de materiais usados na moldagem da matriz dos compósitos (kg/m³).	77
Tabela 9 – Consistência e massa específica das argamassas frescas.....	97
Tabela 10 – Valores da porosidade, absorção de água e massa específica das misturas de argamassa.	99
Tabela 11 – Resistência à compressão e Módulo de Elasticidade das matrizes. ...	101
Tabela 12 – Valores da resistência a compressão diametral das matrizes.	104
Tabela 13 – Tenacidade à fratura e energia de fratura das matrizes.	105
Tabela 14 – Consistência e massa específica dos compósitos frescos.	108
Tabela 15 – Valores da porosidade, absorção de água e massa específica;	109
Tabela 16 – Resistência à compressão, módulo de elasticidade e deformação na tensão máxima dos compósitos.	112
Tabela 17 – Parâmetros dos ensaios de flexão nos compósitos.....	116
Tabela 18 – Quantidade média de fissuras dos corpos de prova de flexão.	121
Tabela 19 - Parâmetros obtidos nos ensaios de tração direta nos compósitos.	124
Tabela 20 – Quantidade média de fissuras dos corpos de prova de tração.....	128
Tabela 21 – Valores das durezas, obtidos pelo índices esclerométricos dos diferentes compósitos.	129
Tabela 22 – Propriedades do concreto.	130
Tabela 23 – Resultados dos desgastes por erosão em 12h e 72h nos diferentes compósitos.	132
Tabela 24 – Profundidade média dos corpos de prova expostos à erosão.....	136

Tabela 25 – Valores das profundidades de desgaste dos compósitos e conjuntos reparados.137

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	18
1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	24
1.1 Desgaste superficial do concreto	24
1.1.1 Processo abrasivo	25
1.1.2 Processo erosivo	31
1.2 Testes de resistência à abrasão e erosão	32
1.2.1 Classes de erosão	35
1.3 Compósitos cimentícios de alto desempenho	36
1.3.1 Conceitos	36
1.3.2 Aplicações	41
1.3.3 Fibras e transferência de tensões no compósito	43
1.3.4 Interface fibra-matriz	46
1.4 Matriz do SHCC	46
1.4.1 Cinza volante	48
1.4.2 Metacaulinita	49
1.5 Propriedades mecânicas	50
1.5.1 Compressão	50
1.5.2 Flexão	53
1.5.3 Tração direta	54
1.6 Resistência à abrasão e erosão	56
2 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL	59
2.1 Introdução	59
2.2 Materiais utilizados na fabricação do concreto	61
2.2.1 Cimento	61
2.2.2 Areia	62
2.2.3 Brita	62
2.2.4 Água	63
2.3 Materiais utilizados na fabricação dos compósitos	63
2.3.1 Cimento	63
2.3.2 Cinza volante	64
2.3.3 Metacaulinita	64

2.3.4	Areia	65
2.3.5	Superplastificante	66
2.3.6	Água	67
2.3.7	Fibra.....	67
2.4	Moldagem do concreto.....	68
2.5	Moldagem dos compósitos, matriz e reparo do concreto.....	70
2.5.1	Moldagem do reparo do concreto	75
2.5.2	Moldagem da matriz dos compósitos.....	76
2.6	Ensaaios experimentais no concreto	77
2.6.1	Propriedades no estado fresco	77
2.6.1.1	Consistência	78
2.6.1.2	Massa específica	78
2.6.2	Propriedades físicas do concreto endurecido	79
2.6.2.1	Índice de vazios, absorção de água e massa específica	79
2.6.3	Propriedades mecânicas	79
2.6.3.1	Compressão axial	79
2.6.3.2	Tração por compressão diametral	80
2.7	Ensaaios experimentais nos compósitos, matrizes e conjuntos	
	reparados	81
2.7.1	Propriedades no estado fresco	81
2.7.1.1	Consistência	81
2.7.1.2	Massa específica	82
2.7.2	Propriedades físicas no estado endurecido	83
2.7.2.1	Índice de vazios, absorção de água e massa específica	83
2.7.3	Propriedades mecânicas	83
2.7.3.1	Compressão axial	84
2.7.3.2	Tenacidade à fratura.....	85
2.7.3.3	Flexão	86
2.7.3.4	Compressão diametral.....	88
2.7.3.5	Tração direta	88
2.8	Ensaaios de dureza superficial	90
2.9	Ensaaios de erosão	94
3	RESULTADOS	97
3.1	Propriedades das matrizes dos compósitos.....	97

3.1.1	Propriedades no estado fresco	97
3.1.2	Propriedades físicas	98
3.1.3	Compressão axial	100
3.1.4	Compressão diametral.....	103
3.1.5	Tenacidade e energia de fratura das argamassas.....	105
3.2	Propriedades dos compósitos	108
3.2.1	Propriedades no estado fresco	108
3.2.2	Propriedades físicas no estado endurecido	109
3.2.3	Propriedades mecânicas	110
3.2.3.1	Compressão axial e módulo de elasticidade	110
3.2.3.2	Flexão	115
3.2.3.3	Tração direta	122
3.2.4	Dureza superficial	129
3.3	Erosão em compósitos e no concreto reparado.....	130
4	CONSIDERAÇÕES FINAIS	139
	REFERÊNCIAS.....	142

INTRODUÇÃO

As principais características que distinguem os compósitos cimentícios com endurecimento na tração direta, do inglês *strain hardening cementitious composites* (SHCC), de outros tipos de compósito são que eles exibem um comportamento de acréscimo ou estabilização (manutenção) da carga após a formação da primeira fissura, enquanto a deformação também aumenta. A sua alta ductilidade decorre da formação de múltiplas microfissuras (de abertura inferior a 100 μm), que não comprometem a durabilidade sob o ponto de vista de mecanismos de transporte de agentes agressivos (LI, 2019).

Segundo Li (2004), devido as suas características, o SHCC tem sido utilizado no reparo de barragens, canais de irrigação e paredes de contenção de represas, e na construção e reparo de tabuleiros de pontes. A sua alta capacidade de absorver energia também o torna um material adequado a ser utilizado sob cargas de impacto.

Muito se discute a respeito da durabilidade de estruturas de concreto. Essas estruturas, em distintos lugares ao redor do mundo, são expostas a inúmeros fatores externos, como temperatura do ambiente, ataques agressivos e impactos provocados por corpos e água.

Segundo Li (2019), com a finalidade de aumentar a vida útil dessas estruturas, pesquisadores da construção civil estão desenvolvendo compósitos do tipo SHCC, com diferentes finalidades, de modo que ele possa armazenar calor, autodetectar movimentações em sua estrutura ou até mesmo controlar a abertura das próprias fissuras.

Esse material é confeccionado à base de cimento, fibras curtas dispersas na matriz e agregado miúdo, como areia microsilica, com tamanho máximo de 300 μm . Outra característica do SHCC é o elevado uso de adições minerais, como cinza volante, escória de alto forno e sílica ativa (LI 2019), com o objetivo de obter um comportamento de *strain hardening*. Em particular, a cinza volante tem sido a adição mineral mais utilizada na fabricação do compósito, devido à melhora da trabalhabilidade da mistura, aumento da ductilidade do compósito e maior robustez no desempenho na tração (WANG e LI, 2011; YANG et al., 2007). Além de reduzir o calor de hidratação e a retração e aumentar o índice de sustentabilidade do material. Uma mistura típica do SHCC, chamada de M45-ECC (WANG e LI, 2011), por exemplo,

utiliza cinza volante no teor de 1,2 vezes a massa de cimento. No entanto, considerando a realidade atual do mundo, mas especificamente, o Brasil, já não há tanta disponibilidade de cinza volante para o uso na construção civil. Segundo Ruben (2016), o fornecimento anual global de cinza volante é inferior a 30% do cimento produzido e, não mais do que 1/3 das cinzas volantes são adequadas para serem utilizadas em misturas cimentícias, sendo os outros 2/3 de "má qualidade", ou seja, apresentam características indesejáveis que podem afetar sua utilidade e desempenho.

Segundo Sheng e Zhang (2005), alguns fatores que podem resultar em cinza volante de má qualidade incluem alta concentração de impurezas, tamanho de partícula inadequado, teor excessivo de umidade, elevado conteúdo de carbono não queimado ou composição química desfavorável. De acordo com a NBR 12653 (2015), essa qualidade pode ser avaliada por meio de análises laboratoriais e testes específicos, levando em consideração os requisitos e padrões estabelecidos para seu uso em diferentes aplicações. A cinza volante de má qualidade pode apresentar dificuldades na confecção dos compósitos, reduzir a resistência e a durabilidade dos materiais de construção, e impactar negativamente suas propriedades físicas e químicas.

É importante que a cinza volante seja produzida e utilizada de acordo com as diretrizes e normas técnicas para garantir que ela contribua positivamente para as propriedades desejadas dos produtos finais. Além disso, o fornecimento futuro de cinzas volantes é questionável, pois a eletricidade da queima de carvão está sendo reduzida em muitos países que enfrentam a pressão do imposto do carbono (YU *et al.*, 2020). Assim, é real o interesse em buscar distintas adições minerais, com o objetivo de reduzir a dependência do uso da cinza volante na fabricação desses compósitos.

A possibilidade do uso de metacaulinita no SHCC tem recebido atenção dos pesquisadores nos últimos anos, principalmente com o avanço da tecnologia na fabricação de aditivos químicos redutores de água. O principal ponto positivo para o uso da metacaulinita em compósitos cimentícios é a abundância da matéria prima usada na sua produção (ANTONI *et al.*, 2012). Segundo o IPECE (Instituto de Pesquisa e Estratégica Econômica do Ceará), o Brasil e os Estados Unidos detêm em torno de 86% da reserva mundial do caulim. Outra possibilidade é a obtenção da metacaulinita a partir de resíduos de indústrias que utilizam o caulim como matéria-prima (MOREIRA *et al.*, 2014), o que aumenta o índice de sustentabilidade do material

(DO CARMO e PORTELLA, 2008). Embora a metacaulinita seja produzida também por queima, no processo é utilizada menos energia que o gasto na produção do cimento e da cinza volante, pois ela é obtida pela calcinação de argilas cauliníticas em temperaturas de 600-800°C, enquanto o clínquer de cimento Portland é obtido a uma temperatura de 1450°C e a cinza volante a uma temperatura de 700-1000°C (ANTONI *et al*, 2012).

Os poucos estudos encontrados na literatura sobre o uso de metacaulinita em SHCC relatam que, o uso de metacaulinita melhorou a dispersão das fibras e aumentou a ductilidade (GÖDERK *et al.*, 2017; FELEKOG˘LU *et al.*, 2016), no entanto, esse desempenho depende da finura da metacaulinita. Zheng (2018) indicou que uma combinação de 90% de cimento, 5% de metacaulinita e 5% de pó de calcário aumentou a ductilidade na tração e diminuiu a abertura de fissuras do SHCC. No entanto, Özbay *et al* (2012) sugeriu em sua pesquisa que o uso de metacaulinita resultou em maiores abertura de fissuras. Santana e Magalhães (2022) indicaram que o uso de um teor de metacaulinita/cimento igual a 0,8 proporcionou maiores valores de resistência à compressão e capacidade de deflexão no SHCC, em relação a mistura sem metacaulinita. Já o módulo de elasticidade e a tensão máxima pós-fissuração foram similares. No entanto, a consistência das misturas frescas foi negativamente afetada. Assim, a viabilidade da utilização de metacaulinita na fabricação de compósitos parece viável e merece mais pesquisas. Além disso, a sua combinação com a cinza volante poderia aliar o benefício das duas, ou seja, o aumento da resistência em idades iniciais, devido ao uso de metacaulinita, e a melhora da trabalhabilidade da mistura, devido ao formato esférico das partículas de cinza.

Estruturas em contato com a água sofrem o processo de erosão, que é o desgaste causado pela passagem abrasiva dos fluidos contendo partículas finas suspensas. Esse desgaste ocorre geralmente em vertedores de barragens ou canalizações. Kormann (2002) cita o aumento do efeito erosivo nas estruturas quando a água contém ácidos e sais reagentes com elementos do cimento dissolvido.

A composição do SHCC, incluindo o tipo de cimento, adições minerais, fibras e aditivos, pode afetar sua resistência à erosão. Por exemplo, a adição de fibras pode melhorar a resistência à erosão por impacto de partículas sólidas, enquanto adições minerais podem influenciar a microestrutura do material e sua suscetibilidade à erosão (THAKRE *et. al.*, 2017).

A erosão em SHCC é um aspecto importante a ser considerado no desenvolvimento e na aplicação desses materiais, e sua compreensão é essencial para garantir o desempenho adequado em ambientes onde a erosão pode ser um problema.

Uma das alternativas para atenuar os efeitos erosivos nas estruturas em contato com a água é a utilização do SHCC como reparo. Em razão disso, este trabalho tem como objetivo estudar as propriedades físicas e mecânicas, o fenômeno de erosão e a dureza superficial em compósitos cimentícios reforçados com fibras, com elevada capacidade de deformação, quando utilizados como uma camada de reparo superficial em estruturas hidráulicas e apresentando diferentes teores de cinza volante e metacaulinita.

Motivação

Atualmente, em contextos de construção, é necessário que haja estudos capazes de descobrir novas formas de desenvolvimento na área de materiais, uma vez que aumenta a demanda para a vida útil das construções e, paralelamente, aumenta os casos de estruturas que se desgastam diante de fatores externos. Desta forma, a utilização do SHCC em estruturas submersas é vista como uma resposta para a retardação e/ou mitigação de impactos negativos sobre a vida útil dessas construções. A importância do estudo de erosão neste tipo de material tem sido amplamente discutida nos últimos anos por conta dos bons resultados já encontrados na literatura científica, porém esses resultados não são tão completos quanto necessários, tendo em vista que o fenômeno de erosão são dependentes da composição e características dos materiais utilizados nas construções ou no reparo das estruturas. Assim, este trabalho tem caráter científico como sua principal motivação, com o objetivo de buscar soluções e métodos alternativos para a diminuição da erosão em estruturas expostas a água com a utilização de compósitos cimentícios do tipo SHCC.

Objetivo geral

Estudar a influência das blendas de cinza volante e metacaulinita no fenômeno de erosão em compósitos cimentícios reforçados com fibras de PVA, que apresentam elevada capacidade de deformação, quando utilizados como uma camada de reparo superficial em estruturas hidráulicas.

Objetivos específicos

Analisar a influência do uso combinado de cinza volante e metacaulinita nas propriedades físicas e mecânicas de compósitos cimentícios reforçados com fibras de PVA.

Estudar as propriedades de fratura, físicas e mecânicas das matrizes dos compósitos com blendas de cinza volante e metacaulinita.

Estudar o comportamento de compósitos com diferentes blendas de cinza volante e metacaulinita quando utilizados como camada de reparo em substratos de concreto, e expostos a erosão pelo método subaquático, afim de entender de maneira geral quais teores de cinza volante e metacaulinita são ideais para que a resistência à erosão seja melhorada.

Estudar a influência do uso de cinza volante e metacaulinita na dureza superficial dos compósitos cimentícios.

Verificar se há correlações entre os resultados dos ensaios mecânicos, físicos e de dureza superficial com a resistência à erosão dos compósitos.

Estrutura do documento

Na seção inicial do manuscrito são apresentados, de forma breve, o resumo e a introdução do conteúdo que será discutido no presente trabalho, além da motivação e dos objetivos geral e específicos para o desenvolvimento desta pesquisa.

No primeiro capítulo é apresentada a revisão bibliográfica que serve como base para o desenvolvimento do trabalho. Nessa revisão é citado como ocorre o desgaste superficial do concreto em forma de abrasão e erosão, as características

do SHCC como material de reparo, a composição da matriz do SHCC, as propriedades mecânicas dos compósitos cimentícios com endurecimento na tração e, de que maneira esses materiais respondem quando expostos a processos erosivos.

No segundo capítulo é abordado o procedimento experimental realizado no trabalho, explicitando as misturas e caracterização dos materiais, ensaios para determinação das propriedades das matrizes e dos compósitos no estado fresco e endurecido, além dos ensaios para a determinação da tenacidade à fratura das matrizes, da dureza superficial dos compósitos e da resistência à erosão dos compósitos e conjuntos reparados.

No terceiro capítulo são realizadas as análises dos resultados obtidos a partir dos ensaios experimentais. São apresentados os resultados de todas as propriedades destacadas no segundo capítulo, justificando e correlacionando as soluções.

No quarto capítulo são apresentadas as conclusões da pesquisa.

1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

1.1 Desgaste superficial do concreto

O fenômeno do desgaste superficial consiste em um processo de deterioração dos materiais ao longo do tempo (ABITANTE, 2004), que ocorre devido à ação de forças externas, como atrito, abrasão, erosão, impacto ou ação de substâncias químicas, podendo resultar em perda da aparência e funcionalidade da superfície do concreto. Sendo assim, o desgaste superficial constitui em um dos aspectos da durabilidade dos materiais.

Li (2019) define o desgaste como sendo a remoção progressiva de material da superfície de um corpo sólido, devido a uma ação mecânica provinda do contato e movimento relativo contra um agente sólido, líquido ou gasoso. Em geral, o processo envolve a remoção de material, consiste em um processo mecânico; apresenta caráter progressivo, e exige movimento relativo entre materiais ou superfícies. Por conta de o tempo ser um grande fator nesse desgaste superficial, é importante a observação a respeito da não linearidade das alterações sofridas por determinado material, peça ou estrutura que está sob condições de agressividade do meio (KAZMIERCZAK e SILVA FILHO, 2011).

O desgaste pode ocorrer através de quatro mecanismos básicos, que atuam de forma isolada ou em conjunto, sendo conhecidos como desgaste adesivo, abrasão, fadiga e reação triboquímica (IBÁÑEZ, 1998).

Limitando-se à descrição do desgaste superficial em materiais por abrasão, o mesmo é definido como um mecanismo de desgaste que ocorre em função do movimento relativo entre materiais com durezas diferentes. Abitante (2004) menciona a participação das irregularidades existentes nas superfícies dos materiais no desenvolvimento do processo abrasivo.

A fundamentação teórica para o encaminhamento do problema de desgaste tem como definição inicial o mecanismo de falha, ou seja, a forma como o material rompe sob tensão (ABITANTE, 2004). Para uma grande parte dos trabalhos analisados, o mecanismo da abrasão pode se manifestar por meio de riscos e cortes (ABITANTE, 2004; IBÁÑEZ, 1998; SCHACKELFORD, 1999). Estes riscos e cortes

provocam a concentração de tensões na superfície do material, ocasionando o aparecimento de fissuras.

Mehta e Monteiro (2014) enfatizam que na prática, as causas físicas e químicas de deterioração em estruturas de concreto frequentemente se sobrepõem. Ocorridos os desgastes físicos, como a abrasão, há um aumento da exposição da superfície de concreto a agentes agressivos, tais como a chuva ácida, e como consequência o ataque pelos compostos químicos presentes nesta são favorecidos. Ocorridos os desgastes químicos como, por exemplo, a lixiviação, o concreto se torna mais poroso, facilitando o processo de abrasão, e assim de forma sucessiva. Estes fatos fazem com que ambos os processos de deterioração, físico ou químico, resultem em um ciclo de difícil dissociação ou estabilização.

1.1.1 Processo abrasivo

São três os mecanismos envolvidos na remoção ou perda de material pelo processo abrasivo: microlascamento, micro corte e microsulcamento (FEIJÃO et al., 1996).

O microlascamento é o arrancamento de material superficial decorrente da formação e aglutinação de trincas na superfície. Estas trincas resultam da ação de tensões cuja magnitude supera a tensão de ruptura do material. Micro corte ocorre em função de tensões de cisalhamento que se localizam a frente da partícula abrasiva, as quais causam a remoção de material através da formação de micro cavacos. Microsulcamento não implica em perda significativa de massa, uma vez que apenas provoca o deslocamento do material extraído (ABITANTE, 2004).

O mecanismo preferencial de ocorrência do processo abrasivo depende das características do material, as quais estão atreladas à tenacidade, ao módulo de elasticidade e à dureza, e também ao nível de tensões a que o corpo está submetido, sendo este estabelecido pela força normal e pela velocidade de translação das partículas abrasivas (FEIJÃO et al., 1996). Dias, Quinteiro e Boschi (2000) e Feijão et al. (1996) destacam que o microlascamento é considerado o principal mecanismo de deterioração para materiais frágeis, onde a tensão mínima necessária para a nucleação de trincas corresponde à tenacidade do material. Esta abordagem permite

que a abrasão em materiais frágeis seja interpretada através da Mecânica da Fratura (ABITANTE, 2004).

Bibliografias ao redor do mundo destacam a abrasão como deterioração principal, uma vez que é um dos maiores causadores da perda de material ou massa em concretos, além de ser uma manifestação patológica presente em muitas estruturas como pisos de concreto (MEHTA e MONTEIRO, 2014; CHODOUNSKY e VIECILI, 2007; YAZICI e INAN, 2006; LIMA, 2000; SEBÖK e STRÁNĚL, 2004; ROCHER, 2007, TARR e FARNY, 2008; FONSECA, 2009).

Distintas bibliografias, como Mehta e Monteiro (2014), Neville (2015) e Choudounsky e Viecili (2007) definem o processo abrasivo como a perda de massa pelo atrito seco, normalmente encontrado em pavimentos e pisos de concreto. De acordo com Yazici e Inan (2006) e Çavdar e Yetgin (2010), o tráfego de pessoas e de veículos é responsável pelo desgaste por abrasão de uma superfície de concreto, assim como a ação do vento e o impacto ou atrito entre dois ou três corpos causado pelo arraste de partículas ou objetos soltos (ver Figura 1). Acreditava-se que os mecanismos de desgaste abrasivo eram causados devido ao corte iniciado por objetos cortantes ou por partículas sólidas, como consta em RIJEZA METALURGIA¹ portanto a análise microscópica explicita que existem mecanismos indiretos que causam esse desgaste, sendo remoção de partículas por corte, fratura, fadiga e formação de grãos.

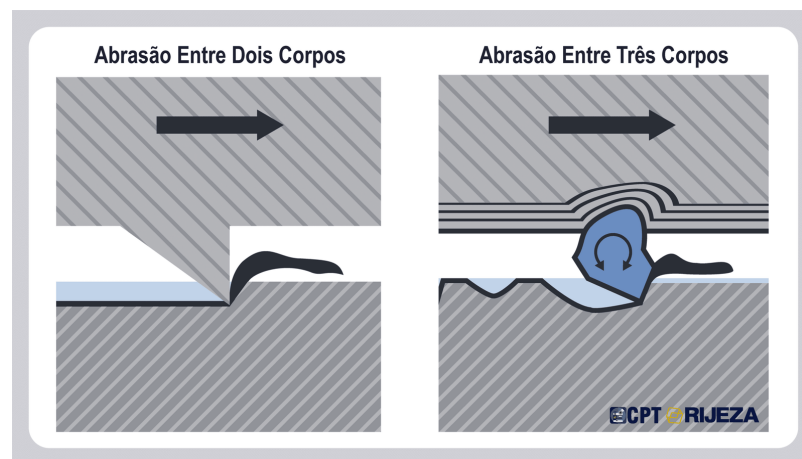


Figura 1 - Abrasão entre dois e três corpos de prova (RIJEZA METALURGIA, online)¹.

¹ Disponível em: <<https://rijeza.com.br/blog/desgaste-por-abrasao-como-acontece-e-como-resolver/>> Acesso em: 06/01/2023.

De forma geral, o mecanismo de deterioração superficial começa através do desprendimento dos componentes do concreto de menor resistência mecânica e de menor capacidade de aderência. O principal fator é o desprendimento do hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2) que encontra-se na pasta de cimento hidratada numa proporção elevada (entre 20% - 25 % do volume de sólidos da pasta), principalmente na forma de cristais precipitados (Portlandita). O Ca(OH)_2 , embora considerado benéfico para a proteção das armaduras contra a corrosão no concreto, ao mesmo tempo constitui-se em um composto extremamente instável do ponto de vista químico e mecânico (KAZMIERCZAK, 2011; METHA E MONTEIRO, 2014). Logo, esse composto químico é responsável por uma importante parcela do mecanismo de desgaste por abrasão, o que é ainda mais grave quando a cura do concreto é deficiente ou inexistente; ou ainda, quando utiliza-se concretos com alta relação a/c.

Independentemente da origem do problema, o desprendimento do Ca(OH)_2 ocorre na etapa inicial do processo de perda de material (KAZMIERCZAK, 2011). Desta forma, a pasta se torna mais enfraquecida, fato que está intimamente associado a eventuais poros e fissuras pré-existentes na superfície, os quais causam uma distribuição desuniforme dos esforços mecânicos gerados pela ação abrasiva. Seguidamente a este processo, ocorre a perda de massa do material, com ruptura e desprendimento de outros componentes da pasta e dos agregados miúdos (areia e outros finos), formando-se pequenas crateras na superfície do concreto. A Figura 2 apresenta, de forma ilustrativa, o processo de evolução do desgaste por abrasão em superfície de concreto.

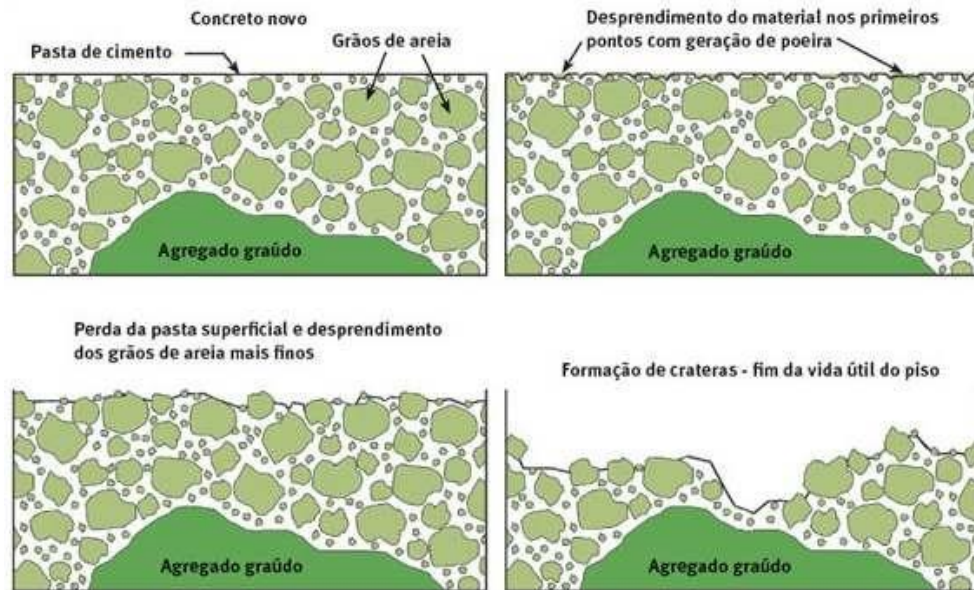


Figura 2 - Processo de perda de material por abrasão com formação de poeira em superfície de concreto (KAZMIERCZAK, 2011).

Em seguida são descritos fatores considerados importantes no processo de abrasão de pisos de concreto:

- Relação água cimento: é um dos principais fatores a ser considerado para o aumento da resistência à abrasão dos pisos de concreto. Sua redução implica no aumento da resistência do concreto, isto é, para uma melhoria da resistência à abrasão deste material é necessário um aumento da sua resistência característica. Em geral, isto tem consequência em um aumento de custo para o projeto (VIECILI, 2004), a não ser que parte do cimento seja substituído por adições minerais de menor custo, tais como a cinza volante e pó calcáreo (STACK et al., 2011). A Figura 3a demonstra esta dependência.

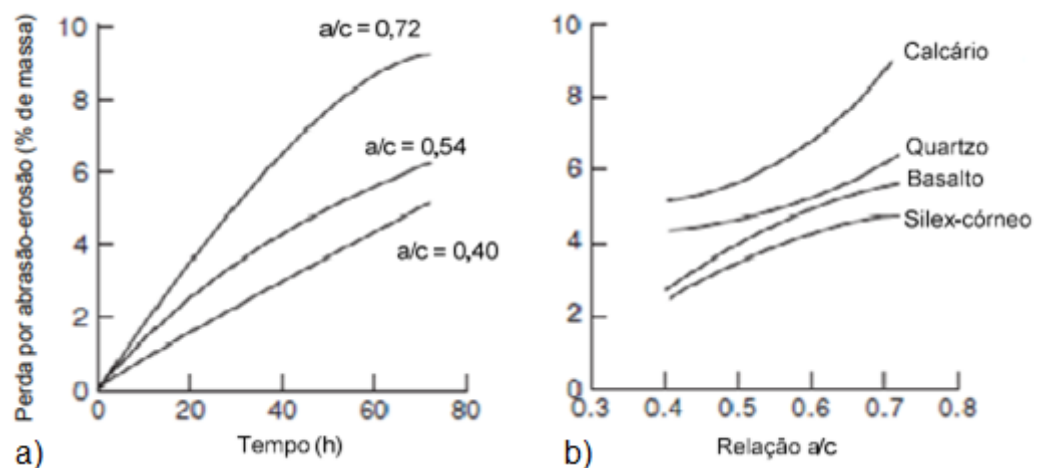


Figura 3 - Influência da (a) relação a/c e do (b) tipo de agregado na resistência à abrasão de concretos (KAZMIERCZAK, 2011).

- Consumo de cimento: a fixação do consumo mínimo de cimento está associada à resistência dos concretos usualmente empregados em pisos, uma vez que pode proporcionar uma adequada resistência interna do material. Além disso, na fase de acabamento deve haver uma quantidade de pasta suficiente para o fechamento e alisamento superficial. Se o teor de pasta não for suficiente, as partículas de agregado graúdo podem refletir na superfície dos concretos, aparecendo como pontos escuros (FONSECA, 2009). Contudo, teores muito altos de argamassa podem ocasionar a delaminação da camada superficial da estrutura (RODRIGUES e MONTARDO, 2002) e aumentar o potencial de retração por secagem, levando à fissuração e ao empenamento desta camada (TARR e FARNY, 2008).

- Agregados: Fonseca (2009) cita que a forma das partículas de agregado influencia diretamente as propriedades do concreto, como a trabalhabilidade, o ângulo de atrito interno, a compacidade e, em última análise, todas aquelas que dependem da quantidade de água de amassamento. Embora a resistência à abrasão do concreto tenha um acréscimo com a dureza e rugosidade dos agregados graúdos (TARR e FARNY, 2008), é a resistência ao desgaste da pasta composta pelos agregados miúdos e pelo cimento, assim como a ligação desta com os agregados graúdos, que condiciona a resistência à abrasão dos compósitos cimentícios (FONSECA, 2009). Na Figura 3b é visto que melhores resistências à abrasão são proporcionadas pelo uso de agregados graúdos de elevada dureza.

Com relação aos agregados miúdos, a distribuição granulométrica destes exerce um papel de extrema importância na determinação do consumo de água de amassamento do concreto, na trabalhabilidade, na exsudação e no acabamento superficial (CHODOUNSKY e VIECILI, 2007). Habitualmente, reduzir o teor de agregados finos pode resultar em melhoria na resistência à abrasão, desde que não haja aumento excessivo da exsudação e segregação das misturas de concreto (ACI 302.1R-04, 2004). Além disso, a camada superficial da pasta dos concretos contendo areia natural resiste melhor ao desgaste do que as superfícies dos concretos contendo agregados finos provenientes da britagem de rochas (TARR e FARNY, 2008). Diferentes tipos de agregados graúdos com distintas formas, texturas e mineralogias podem resultar em concretos com diferentes resistências. Mehta e Monteiro (2014) e Liu (1981) ressaltam um estudo onde o autor verificou que a utilização de agregados com elevada dureza proporcionou melhores resistências à abrasão para os concretos estudados. Em concretos com resistência acima de 56 MPa, a dureza dos agregados graúdos tem influência mínima na resistência ao desgaste, uma vez que ocorre uma redução da relação água/material cimentício (a/mc) (VIECILI, 2004). Por consequência, uma melhora significativa da argamassa é esperada, a qual passa a contribuir de forma incisiva para a resistência à abrasão do concreto. Já para resistências entre 21 MPa e 35 MPa, a resistência à compressão do agregado graúdo tem forte influência nos resultados, pois nestes concretos a relação a/mc da matriz cimentícia passa a ser o elo mais fraco, desgastando-se mais facilmente. Portanto, no caso de agregados de baixa qualidade, todo o concreto pode passar por um processo de desgaste rapidamente.

- Adições minerais: as adições são materiais minerais finamente moídos e misturados ao concreto para se obter características específicas. Por serem muito finos, estes atuam como pontos de nucleação no concreto, quebrando a inércia do sistema e fazendo com que as partículas de cimento reajam com a água mais rapidamente. Com a aceleração dessa reação, o concreto atinge resistências mais elevadas nas primeiras idades. No entanto, a aceleração do ganho de resistência nas primeiras idades depende das características de cada adição, como atividade pozolânica e finura. Dentre as mais usadas em misturas cimentícias, encontram-se a sílica ativa, a cinza volante e a escória granulada de alto forno.

Em geral, a pasta endurecida tem baixa resistência à abrasão (SIDDIQUE et al., 2007). Por isso, para que concretos sejam mais resistentes a esta deterioração é

desejável que tal material apresente elevada dureza superficial e baixa porosidade (MEHTA e MONTEIRO, 2014; NAIK et al., 2002; YAZICI e INAN, 2006; SIDDIQUE, 2007). Para alguns autores como Atis (2002), Siddique (2003), Li et al. (2006), García, Fresno e Polanco (2008), Çavdar e Yetgin (2008), além dos parâmetros já abordados, os tipos de endurecedores ou coberturas, as condições de cura e o teor de ar incorporado também influenciam a resistência do concreto ao desgaste superficial.

Neville (2015) cita que a resistência mínima necessária vai depender da severidade da abrasão esperada. ACI 201.2R-92 (2016) frisa que concretos sujeitos a solicitações de abrasão devem ter pelo menos 28 MPa de resistência à compressão.

Para garantir a qualidade deste concreto superficial, é necessário evitar segregações e exsudação excessivas, controlar a duração das operações de acabamento, proibir a adição de água para auxiliar o acabamento, desta forma evitando um aumento da relação a/c na superfície, retirar o excesso de água desta superfície antes do acabamento e promover cura apropriada e eficiente (normalmente mais prolongada do que a usual), para proporcionar a hidratação do cimento nas camadas externas e reduzir a porosidade (BRANDÃO, 1998). Além disso, a utilização de revestimentos absorventes nas fôrmas pode contribuir para a redução da relação a/c no concreto da superfície, aumentando sua resistência.

1.1.2 Processo erosivo

Erosão descreve o desgaste abrasivo no concreto, proveniente de fluídos contendo partículas sólidas em suspensão. Este processo ocorre em estruturas hidráulicas, como revestimentos de canais, vertedouros e tubulações de concreto para transporte de água ou esgoto.

O desgaste por erosão depende da porosidade e resistência do concreto, além de quantidade, tamanho, forma, densidade, dureza e velocidade das partículas em movimento. Mehta e Monteiro (2014) destacam que se a quantidade e o tamanho dos sólidos forem pequenos, como iodo em canal de irrigação, o desgaste por erosão se apresenta de forma insignificante. O desgaste erosivo é causado em corpos sólidos pela ação do impacto. Zum Gahr (1987) evidencia que o ângulo de incidência das partículas influencia o desgaste substancial e pode modificar os mecanismos.

Estudos anteriores de Zum Gahr (1987) e Chagas (2017) sobre desgaste erosivo observaram que a dureza é algo importante, mas que não pode ser um critério único a ser avaliado. Dan'Kin (1970) identificou que quanto menor o valor do módulo de elasticidade, maior a resistência a esse desgaste. Yang et al. (2012) cita a importância da baixa porosidade, enquanto Santos et al. (2006) registram que não foi observado o aumento do desgaste por erosão com o aumento da porosidade. Além disso, Santos et al. (2011) indica que a melhor correlação obtida na resistência à erosão é com a resistência à compressão, permitindo aos fabricantes uma rápida correlação.

Nesse tipo de desgaste, a perda de volume depende principalmente da energia de impacto das partículas quando atingem a superfície, gerada pela velocidade da partícula e massa (KRAUSE et al., 2013). O pior ângulo de impacto das partículas para o desgaste de material erosivo por fratura frágil é 90° (HUTCHINGS, 1992). Diversos estudos já comprovaram a criticidade da projeção das partículas no ângulo normal à superfície (YANG et al., 2012; SANTOS et al., 2006).

O fenômeno de desgaste diminui em diferentes temperaturas, com o aumento da mesma de 25 °C para 1000 °C (YANG et al., 2012). Possivelmente porque a altas temperaturas os agregados se expandem, criando uma força residual de compressão com a matriz, o que faz aumentar a resistência à erosão. Quando em altas temperaturas a matriz se torna mais macia, tornando-se mais tenaz ao impacto (CUNHA-DUNCAN e BRADT, 2003), e sendo provavelmente a principal razão para o aumento da resistência ao desgaste erosivo por fratura frágil.

1.2 Testes de resistência à abrasão e erosão

Os testes para avaliar a resistência à abrasão do concreto são feitos variando as condições de carga, a fim de medir a taxa de desgaste superficial gerada pela fricção com superfícies de outros corpos, peças ou meios com o propósito de quantificar, analisar, prever e mitigar a perda de material em distintos contextos (KAZMIERCZAK et al., 2011), garantindo que o material mantenha suas dimensões e qualidade original ao longo de toda sua vida útil.

O ensaio de abrasão e o ensaio de erosão são dois tipos de testes utilizados para avaliar a resistência de materiais à ação de desgaste e remoção de partículas. Embora ambos estejam relacionados ao desgaste de materiais, existem diferenças significativas entre eles.

O ensaio de abrasão é utilizado para avaliar a resistência de um material à abrasão, ou seja, ao desgaste causado pelo contato e fricção com partículas sólidas abrasivas. Nesse ensaio, uma amostra do material é submetida a uma ação abrasiva, geralmente por meio de um dispositivo rotativo que contém partículas abrasivas. A perda de material ou o desgaste na superfície da amostra é então medida e registrada. O ensaio de abrasão é comumente utilizado para avaliar a resistência de revestimentos, tintas, plásticos, cerâmicas e outros materiais à abrasão.

Por outro lado, o ensaio de erosão é utilizado para avaliar a resistência de um material à erosão, ou seja, ao desgaste causado pelo impacto de partículas transportadas por um fluido, como água ou ar. Nesse ensaio, a amostra do material é exposta a um fluxo controlado de partículas, geralmente em um equipamento de teste específico, que simula o ambiente de erosão desejado. A perda de material ou o desgaste na superfície da amostra é medido e registrado. O ensaio de erosão é comumente utilizado para avaliar a resistência de materiais expostos a condições de erosão, como pás de turbinas hidráulicas, tubulações, superfícies de concreto expostas à ação de água e outros componentes sujeitos a partículas transportadas por fluidos.

Portanto, a principal diferença entre os ensaios de abrasão e erosão está na natureza do desgaste envolvido. O ensaio de abrasão avalia o desgaste causado pelo contato e fricção com partículas abrasivas, enquanto o ensaio de erosão avalia o desgaste causado pelo impacto de partículas transportadas por um fluido. Ambos os ensaios são importantes para determinar a resistência de materiais a diferentes tipos de desgaste e ajudam na seleção e desenvolvimento de materiais mais adequados para aplicações específicas.

De maneira geral os ensaios de abrasão iniciam-se determinando o método a ser empregado, logo é feita toda a preparação do corpo de prova a partir da amostra e o abrasímetro é selecionado. Esse corpo de prova é pesado e sua massa é anotada para em seguida sua superfície ser desgastada por algum material abrasivo, que é capaz de desgastar, polir ou lixar outros materiais quando há atrito entre os mesmos, sob aplicação de carga e por um período de tempo definido. Para determinar quanto

material foi perdido no ensaio basta calcular a diferença entre a massa final e a massa inicial do corpo de prova, definindo então a taxa de desgaste superficial, que é empregada para analisar a resistência do material à abrasão.

Deve-se notar que cada teste de abrasão é usado para melhor representar um caso específico de abrasão de superfície. Por exemplo, o teste do cortador rotativo, definido pela norma americana ASTM C944 (2019) é usado para simular a abrasão do concreto de pontes e rodovias sujeito ao tráfego, em que as amostras são submetidas a pequenas rodas abrasivas (ASTM C944/C944M, 2005), com o intuito de colisão entre as mesmas, enquanto o teste de jateamento, normatizado pela ASTM C418 (2020) é usado para simular a ação de abrasivos na água e em situações de tráfego na superfície do concreto.

A norma ASTM C779/C779M (2019) contém três diferentes métodos para medir a resistência a abrasão do concreto. O Método A (máquina de desgaste de concreto) envolve o uso de uma máquina que consiste em um tambor rotativo com um revestimento de aço fundido em que amostras cilíndricas de concreto são fixadas no tambor e submetidas a um processo de desgaste rotativo, sendo o desgaste é medido através da perda de massa das amostras. O Método B (máquina de desgaste com bola de aço) consiste em uma máquina com bola de aço utilizada para realizar o ensaio, essas esferas são lançadas repetidamente sobre a superfície da amostra de concreto, causando desgaste. O Método C (máquina de desgaste por jato de areia) consiste em jatos de areia que são direcionados para a superfície da amostra de concreto, causando desgaste abrasivo. Além disso, os resultados dos métodos B e C têm maiores coeficientes de variação que o método A.

Outro teste é o estipulado pela ASTM C627 (2018), que é o método de teste para avaliação de sistemas de instalação de pisos cerâmicos usando o testador de piso tipo Robinson. Este teste foi adaptado para medir a resistência a abrasão do concreto, permitindo que três rodas metálicas desgastem a superfície ao fazer movimentos circulares.

A norma ASTM C 1138 (2019), método subaquático, abrange um procedimento para encontrar a resistência à abrasão relativa do concreto sob a água devido à ação das partículas aquosas (areia, cascalho e outros detritos). No ensaio são utilizadas esferas sólidas suspensas que produzem abrasão no concreto. A amostra é colocada no recipiente com a superfície a ser testada voltada para cima enquanto uma pá

agitadora imersa na água inicia as atividades de rotação com finalidade de fazer as esferas se chocarem contra a superfície do concreto.

Além das normas americanas, a Turquia e a Grã-Bretanha têm normas que são comumente usadas para testar a resistência à abrasão do concreto. A norma turca TS 699 (2009), Bohme Surface Abrasion Device - Métodos de teste para pedras naturais de construção, envolve um corpo de prova de concreto sendo aplicado a uma roda de aço giratória, de modo que uma pasta abrasiva também pode ser aplicada ao rebolo, e a profundidade do desgaste é registrada após um determinado período de tempo.

A NBR 12042 (2012) detalha o ensaio de abrasão de materiais inorgânicos. No teste corpos de prova em formato de paralelepípedo regular são colocados em um dispositivo de chapa metálica, cada corpo de prova recebe uma carga de 66 N. Esse equipamento contém um anel de ferro fundido que dá 250 voltas, que tem como consequência a perda de massa dos corpos de prova.

1.2.1 Classes de erosão

A norma ASTM C1138 não especifica valores numéricos específicos para as classes de erosão, com velocidades de fluxo de água ou concentrações de partículas abrasivas, em vez disso estabelece categorias qualitativas que descrevem diferentes níveis de erosão. Essas classes de erosão são designadas de A1 (menos severo) a A5 (mais severo) e são usadas para determinar o desempenho esperado dos materiais em ambientes de erosão.

Classe A1: esta é a classe de erosão mais suave, indicando ambientes com baixas velocidades de fluxo de água e exposição limitada a partículas abrasivas. Materiais classificados como A1 são adequados para aplicações em que a erosão é mínima.

Classe A2: é a classe que representa um ambiente um pouco mais agressivo em comparação com A1. As velocidades do fluxo de água e a quantidade de partículas abrasivas são ligeiramente maiores. Materiais classificados como A2 devem ter um desempenho superior à classe A1.

Classe A3: esta classe indica ambientes de erosão moderada, com velocidades de fluxo de água mais elevadas e maior exposição a partículas abrasivas. Materiais nessa classe devem ser capazes de resistir a condições erosivas mais desafiadoras.

Classe A4: nesta classe, a erosão é considerada severa, com velocidades de fluxo de água significativamente elevadas e exposição intensa a partículas abrasivas. Os materiais classificados como A4 devem ter um desempenho excepcional para resistir a ambientes erosivos extremos.

Classe A5: é a classe de erosão mais severa. Ambientes classificados como A5 envolvem erosão extremamente agressiva, com altas velocidades de fluxo de água e exposição intensa a partículas abrasivas altamente concentradas. Materiais nessa classe devem ser altamente resistentes e duráveis para atender aos requisitos de desempenho.

Em resumo, as classes de erosão definidas pela norma ASTM C1138 são uma maneira de categorizar o desempenho esperado dos materiais de revestimento e proteção de concreto em ambientes erosivos, variando de condições mais suaves (A1) a extremamente severas (A5). Essas classificações ajudam os engenheiros a selecionar os materiais adequados para garantir a durabilidade das estruturas em ambientes específicos.

1.3 Compósitos cimentícios de alto desempenho

1.3.1 Conceitos

O termo compósito cimentício reforçado com fibras com alto desempenho (do inglês *high performance fiber reinforced cementitious composites*, HPFRCC) foi introduzido pela primeira vez por Reinhardt e Naaman, em 1992, para definir compósitos cimentícios reforçados com fibras que apresentavam um comportamento de endurecimento (do inglês *strain hardening*) após a formação da primeira fissura, sob cargas de tração direta, além de exibirem uma alta capacidade de deformação, independente das outras propriedades, como a resistência à compressão.

Em concretos, o termo alto desempenho já era empregado para caracterizar concretos com propriedades melhoradas, como resistência à compressão, resistência a altas ou baixas temperaturas ou durabilidade. Em relação a compósitos cimentícios reforçados com fibras, o termo “alto desempenho” foi criado para distinguir uma classe especial de compósitos, em que os benefícios da adição de fibras no comportamento do compósito sob cargas de tração, era superior aos benefícios típicos observados em outros tipos de compósitos cimentícios.

Ainda na década de 90, várias discussões foram conduzidas no sentido de definir o melhor termo para descrever o comportamento de endurecimento e múltipla fissuração do HPFRCC. Isto se deu pelo fato de o termo “alto desempenho” ser subjetivo e poder ser interpretado de diferentes formas, tais como: alta durabilidade, alta resistência à compressão ou tração, mas não necessariamente o comportamento de endurecimento sob cargas de tração direta. Assim, foi criado o termo *strain hardening cementitious composites* (SHCC), para designar todos os compósitos que apresentam um comportamento de endurecimento na tração direta (do inglês, *strain hardening*), independente de outras propriedades. Mas, somente a partir do ano de 2003, a nomenclatura dos compósitos foi padronizada e todos os compósitos com um comportamento de endurecimento da tração direta, passaram a ser designados como *strain hardening cementitious composites*, SHCC (NAAMAN e REINHARDT, 2006).

Naaman (2017) classifica os compósitos cimentícios reforçados com fibras, de acordo com o comportamento da curva tensão-deformação sob cargas de tração direta, como *strain softening* ou *strain hardening*. A Figura 4a ilustra um ensaio de tração direta com corpos de prova de concretos não reforçados, compósitos reforçados com fibras (sigla em inglês FRC) e compósitos do tipo SHCC, e a Figura 4b ilustra as curvas típicas tensão de tração vs deformação.

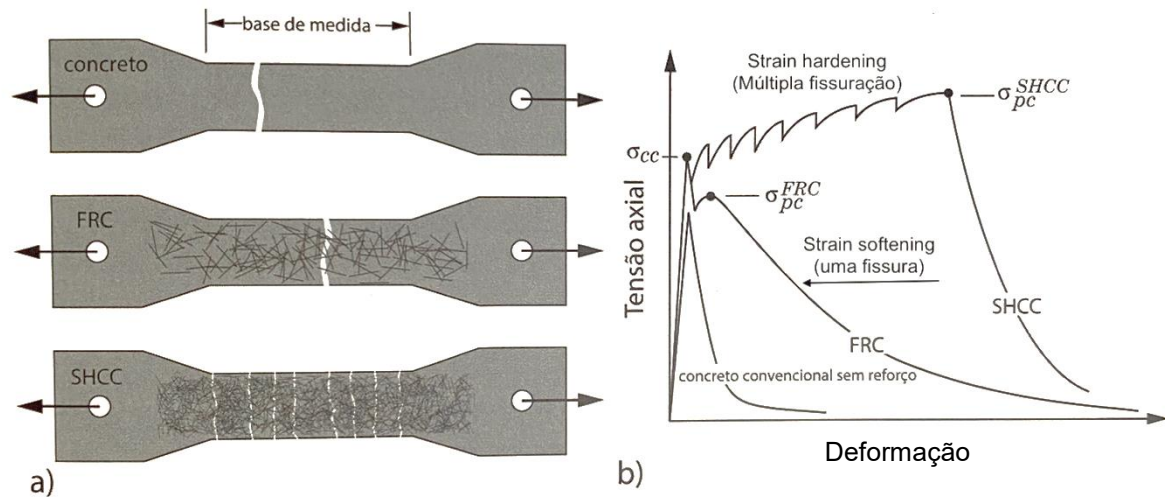


Figura 4 - Representação esquemática do comportamento de um concreto sem reforço e de dois compósitos reforçados com fibras sob cargas de tração: a) tração de corpos de prova b) curva tensão vs deformação (Adaptado de MEHTA e MONTEIRO, 2014).

Compósitos com comportamento *strain softening*, como o FRC, e o SHCC apresentam um comportamento linear até a tensão de primeira fissura (σ_{cc}), a partir deste ponto, o comportamento se diferencia. Os compósitos do tipo *strain softening*, na Figura 4b, apresentam um comportamento de amolecimento após o surgimento da primeira fissura, além de a resistência pós-fissuração (σ_{pc}) ser inferior à resistência de primeira fissura (σ_{cc}). Esse tipo de compósito é caracterizado pela formação de uma única fissura, seguida do rompimento do corpo de prova. A redução gradual da carga (fase de amolecimento na curva) com o alongamento do corpo de prova é devida ao arrancamento gradativo das fibras que atravessam as fissuras. Em alguns casos, o arrancamento da fibra pode ser impedido pela ruptura da fibra, que é o mecanismo de colapso menos desejável, devido à sua natureza mais frágil, semelhante ao comportamento do concreto não reforçado, também mostrado na Figura 4b.

Em compósitos do tipo *strain hardening* (SHCC), após a primeira fissura (σ_{cc}), o compósito apresenta uma manutenção ou aumento da tensão ($\sigma_{pc} \geq \sigma_{cc}$), a medida que a deformação aumenta. O endurecimento na curva é sempre acompanhado pela formação de múltiplas fissuras (registrada pelas quedas na curva tensão vs deformação), que se portam de forma controlada e que distribuem a deformação por tração ao longo do corpo de prova, o que distingue o comportamento deste material

do comportamento do FRC (com comportamento *strain softening*), que concentram toda a deformação na abertura de uma só fissura. Esse processo de formação de múltiplas fissuras continua até que o carregamento no material alcance a resistência de arrancamento das fibras que costuram uma fissura. Ao alcançar a resistência pós fissuração, a fratura na área de uma fissura ocorre, levando a uma queda brusca da tensão de tração no compósito (fase de amolecimento na curva).

De forma análoga, Naaman (2017) também classifica os compósitos cimentícios reforçados com fibras de acordo com a curva tensão-deflexão sob cargas de flexão. Neste caso eles são classificados em *deflection softening* ou *deflection hardening*. Os compósitos do tipo *deflection softening* apresentam um comportamento de amolecimento após a fissuração do compósito, além de a resistência pós-fissuração ser inferior à resistência de primeira fissura. Esse tipo de compósito é caracterizado pela formação de uma única fissura na flexão.

Compósitos *deflection hardening* são conhecidos como compósitos dúcteis, e são caracterizados pelo aumento da tensão na região de fissuração, à medida que a deflexão aumenta, consequentemente havendo formação de múltiplas fissuras (NAAMAN, 2017). É importante destacar que os compósitos com comportamento *strain hardening* também possuem um comportamento de *deflection hardening*. Já os compósitos do tipo *strain softening*, é possível que na flexão tenham um comportamento de *deflection hardening* ou *deflection softening*.

Dentre os SHCC's existentes na literatura, este trabalho enfoca no comportamento do compósito cimentício otimizado (em inglês, *Engineered Cementitious Composites*, ECC). Este tipo de compósito foi desenvolvido no início dos anos 90s por Victor Li e colaboradores (LI, 1998; LI, 2003; LI e LEUNG, 1992; KANDA e LI, 1998) e vem sendo pesquisado intensivamente ao longo dos anos. O método de dosagem utilizado nesse tipo de material é baseado em conceitos da micromecânica tendo como princípio o balanço entre a energia de fratura da matriz e a aderência fibra-matriz (LI, 2019). Devido a isto, é possível projetar um SHCC com uma quantidade muito baixa de fibras curtas (aproximadamente 2% em volume) e distribuídas de forma randômica na matriz (ZHU et al., 2022).

O material retém alta ductilidade e controle de abertura de fissuras durante carregamento de tração. Em comparação com outros tipos de compósitos, que, após a ocorrência de uma fissura ocorre abertura da única fissura formada, o SHCC mostra maior ductilidade na fase de endurecimento. A deformação sob cargas de tração pode

atingir valores superiores a 4% (ver Figura 5), o que é pelo menos 400 vezes maior que a deformação de um concreto comum (LI, 1998; LI, 2011; LI, 2019). Além disso, durante o carregamento ocorre um controle da abertura de fissuras (inferior a 80 μm) até que uma fissura se abra levando o material a ruptura.

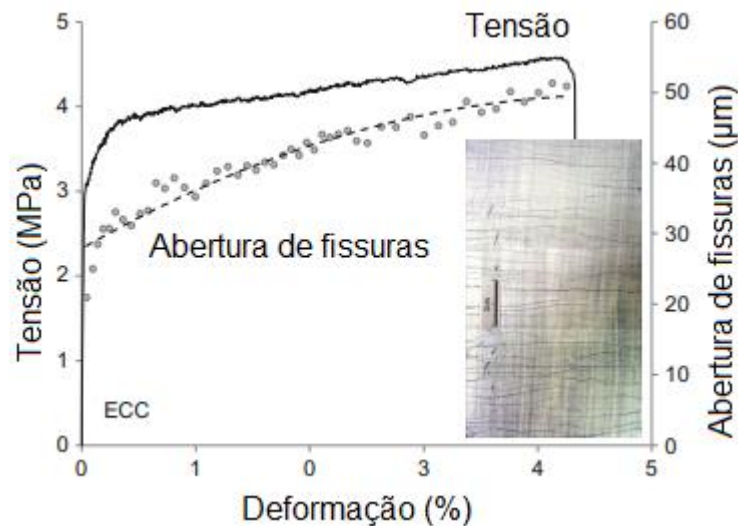


Figura 5 - Endurecimento por deformação do SHCC (LI, 2019).

Muitas vezes é pontuado que a transição de reposta *strain softening* sob cargas de tração de um compósito comum para o modo *strain hardening* de um SHCC ocorre devido ao aumento do teor de fibras. Segundo Li (2019), essa não é uma afirmação errada, porém deve-se tomar cuidado com elevados teores de fibras, pois podem reduzir a trabalhabilidade das misturas, e impactar no desempenho do compósito no estado endurecido. A quantidade de fibras em si não é o único parâmetro a ser levado em consideração, suas propriedades físicas e mecânicas, propriedades da matriz, distribuição das fibras na matriz e aderência fibra-matriz tem um papel importante no desempenho do compósito.

Nos últimos anos, pesquisadores em diferentes países tem buscado desenvolver o SHCC com diferentes propriedades funcionais. Exemplos dessa utilização são o SHCC auto cicatrizante, que é capaz de cicatrizar as fissuras, o SHCC de detecção automática, que é responsável por detectar e avaliar de maneira rápida qualquer mudança na estrutura do material e o SHCC com adaptação térmica, que armazena calor quando a temperatura externa é alta e o libera gradualmente à medida

que a temperatura reduz. Mais detalhes desses compósitos podem ser encontrados em Li (2019).

1.3.2 Aplicações

Em termos de aplicações, o SHCC tem sido utilizado em diferentes países. No Japão ele já foi utilizado no reparo de uma parede de contenção de terra danificada pela reação álcali-agregado em Gifu (ROKUGO et al., 2005) e na represa Mitaka, devido à erosão (KOJIMA et al., 2004). Também foi utilizado na construção do tabuleiro da ponte Mihara em Hokkaido, Japão (Figura 6). Nos Estados Unidos o SHCC foi utilizado no reparo do tabuleiro de uma ponte em Michigan (Figura 7).



Figura 6 - Tabuleiro da ponte Mihara, em Hokkaido, utilizando-se aço e SHCC (LI, 2004).



Figura 7 - Reparo do tabuleiro de uma ponte em Michigan, Estados Unidos, utilizando-se SHCC (LI, 2004).

Ainda existem outras grandes construções em que o SHCC foi utilizado, como no reparo da Barragem da Usina Hidráulica Hohenwarte II, na Turíngia, Alemanha (Figura 8), em que o intuito era superar o vazamento de água e revestir o túnel de água para reduzir a quantidade de trincas e a penetração de sujeiras. Li (2019) cita que o SHCC também foi adotado como material de reparo superficial de canais de irrigação, no intuito de melhorar a resistência à carbonatação, ao congelamento e descongelamento, à fissuração e à abrasão.



Figura 8 - (a) Preparo do SHCC no local (b) Preparação da superfície da barragem (c) Aplicação do SHCC pulverizado e (d) barragem após reparo (LI, 2019).

Estes trabalhos revelaram que a alta ductilidade do SHCC possibilita significativa melhora no desempenho de sistemas estruturais reparados. Li (2019) ressalta que as características do SHCC, como reduzida e controlada abertura de fissuras sob cargas de tração, alta resistência a delaminação, à carbonatação e ao congelamento e descongelamento, e manutenção da permeabilidade, mesmo quando fissurado, o torna eficaz em manter a estanqueidade de sistemas hidráulicos. Estruturas como barragens e canais de irrigação exploram essas vantagens do SHCC para melhorar o desempenho e prolongar sua vida útil.

1.3.3 Fibras e transferência de tensões no compósito

Atualmente, o uso de fibras e a produção de diferentes tipos de compósitos tornou-se possível em diversas aplicações industriais, e implementá-las no mundo desenvolvido é altamente atraente para os setores da construção civil. Utilizar fibras em compósitos resulta em melhores propriedades, como alta ductilidade, alta resistência mecânica, grande capacidade de absorção de energia e resistência contra propagação de fissuras, o que os tornam apropriados para inúmeras aplicações (LIM et al., 1987), além de combater os efeitos da delaminação, fragmentação e fadiga (BRAUNSTEIN, 2020). Por outro lado o uso de fibras também apresentam alguns pontos negativos, como redução da trabalhabilidade dos compósitos e o possível afloramento das fibras em decorrência da baixa densidade das mesmas, principalmente em misturas com elevada plasticidade.

Há estudos datados desde a década de 60 que mencionam a influência das fibras quando colocadas na matriz cimentícia (LIM et al., 1987; BELLETTI et al., 2008). Inicialmente utilizadas como armaduras secundárias, para controle de fissuração em elementos estruturais, hoje existem normas técnicas que regulamentam seu uso, explicitando desde a fabricação das fibras até a produção e características mínimas dos compósitos para diversas utilizações, incluindo fins estruturais (ACI 544.4R, 2018; NBR 16935, 2021; EM 14651, 2007; FAA, 2009; DE SOUZA, 2021).

Sadrinejad et al. (2018) explicitam que as fibras, dependendo de sua geometria, podem ser classificadas em dois tipos principais: micro e macrofibras. As microfibras

são definidas como fibras curtas com um diâmetro máximo de 100 μm e uma área superficial específica superior a 500 cm^2/g . Em contraste, as macrofibras são referidas como fibras maiores em diâmetro e comprimento, em comparação com as microfibras com uma área superficial específica de aproximadamente 10 cm^2/g .

Segundo Naaman (2017), em relação ao material, as fibras são divididas em três grupos básicos: fibras naturais, como o sisal e a juta; fibras minerais, como o amianto; e as fibras industrializadas, as quais incluem as fibras sintéticas (PVA, polietileno, polipropileno, etc.), metálicas e as fibras de vidro. Segundo o ACI 544.1R (2009), apesar das fibras de aço serem as mais utilizadas atualmente, as de polipropileno e PVA possuem natureza não corrosiva e, por isso, podem contribuir para a estrutura em longo prazo sem que haja perda de propriedades mecânicas. A atuação dessas fibras é caracterizada pelo aumento da ductilidade, controle da formação e propagação de fissuras e distribuição de tensões através de todo elemento (DE SOUZA, 2021; CARLESSO, D. M.; DE LA FUENTE, A.; CAVALERO, S. H. P., 2019).

Segundo Li (1993) a fibra mais comumente utilizada no SHCC é o álcool polivinílico (PVA), devido ao alto módulo de elasticidade ($\approx 41 \text{ GPa}$) e alta resistência à tração ($\approx 1600 \text{ MPa}$). No entanto, fibras de PVA, em geral, apresentam elevada aderência química e de atrito, o que demandaria o emprego de volumes entre 4 e 6% no compósito para que o comportamento *strain hardening* fosse atingido. A partir de análises obtidas através de modelo numérico, foi identificado que a redução da aderência química e de atrito resultaria na redução do volume de fibras a ser empregado no compósito (LI, 2019; ZHU et al., 2022; HUANG et al., 2022).

Li et al. (2001) testaram através de experimentos a impregnação da superfície da fibra de PVA com diferentes teores de um material à base de óleo, com o objetivo de reduzir a aderência de contato e química entre a fibra e a matriz e, assim, conseguir o controle desejado da aderência, o qual conduz ao comportamento desejado do material. No experimento foi observado que aumentos na quantidade de óleo significam diminuição tanto na aderência de atrito, como na aderência química das fibras. Fibras de PVA com tratamento utilizando-se 1,2% de cobertura de um material oleoso são geralmente empregadas na produção do SHCC.

Para o SHCC, a adição de fibras pode não apenas superar a fragilidade da matriz, mas também fornecer transferência de tensão suficiente para suportar o

carregamento e gerar energia complementar necessária para o comportamento de *strain hardening*.

A transferência de tensões age de maneira distinta em compósitos cimentícios não fissurados e pré-fissurados. Sovják et al. (2016) ressaltam que nos elementos não fissurados a transferência de tensões é elástica e há proporção de deformação entre a matriz e as fibras, enquanto nos elementos pré-fissurados as fibras atuam como ponte de transferência de tensões de acordo com o mecanismo de transição friccional, de modo que são desenvolvidas tensões de cisalhamento na interface, com possível arrancamento da fibra do corpo da matriz.

As fibras adicionadas a matrizes cimentícias têm maior contribuição após a fissuração da matriz, pois “costuram” e interrompem a propagação das fissuras, evitando uma ruptura brusca (DE SOUZA, 2021). São inúmeros os fatores que influenciam no processo de propagação de fissuras dos compósitos, como o tipo de fibra, seu comprimento e diâmetro, orientação da fibra dentro da matriz em relação à direção, sentido e à taxa do carregamento aplicado, à fração volumétrica de fibras utilizada, à composição da matriz, à energia empregada na mistura do compósito, entre outros (HAN e TAO, 2013).

Para o compósito apresentar elevado desempenho é necessário que as fibras tenham um módulo de elasticidade relativamente maior que a matriz utilizada no compósito, elevada resistência à tração (pelo menos 200 - 300% maior que a matriz) e características de aderência adequadas com a matriz de cimento (NAAMAN et al., 2001).

Segundo Braunstein (2020), baixo volume de fibras ($< 1\%$) é usualmente utilizado em lajes e pavimentos com elevada superfície de exposição para reduzir ou controlar fissuras por retração, um volume médio de fibras (entre 1 e 2 %) é utilizado para elevar o módulo de ruptura, a resistência a fraturas e a resistência a impactos e um alto volume de fibras ($> 2\%$) é usado para aumentar a resistência pós-fissuração e a capacidade de deformação antes da ruptura.

1.3.4 Interface fibra-matriz

Zona de transição interfacial, ou ZTI, é a área em que as fibras e os grãos (agregados miúdos, agregados graúdos e sólidos inertes) entram em contato com a pasta de cimento (cimento, água, ar e aditivos). Essa área tem características particulares, e é por esse motivo que deve ser estudada isoladamente. Sua espessura varia de 20 μm a 70 μm da matriz cimentícia (BENTUR e MINDESS, 1990; ZHANG et al., 1999; WEI et al., 1986), nesse local formam-se hidróxido de cálcio (CH) e etringita em grande quantidade, além do grande volume de vazios, consequência do empacotamento inadequado dos grãos ao redor da fibra ou da concentração abundante de água durante o processo de hidratação (BENTUR e MINDESS, 1990; LÖFGREN, 2005), causando na ZTI uma resistência consideravelmente menor que na matriz cimentícia.

Fatores como tamanho, forma e rugosidade das fibras, além da composição química de sua superfície e o empacotamento da matriz cimentícia influenciam na densidade da ZTI (BENTUR e MINDESS, 1990; SOVJÁK et al., 2016). Para aperfeiçoar característica como densidade e resistência podem ser feitas algumas alterações na matriz como enriquecimento das técnicas de mistura e modificações no empacotamento dos grãos da matriz, com granulometria mais graduada e variação no módulo de finura dos materiais cimentícios. Utilizar fibras de menores diâmetros gera menor espessura da ZTI e fibras com geometria dessemelhante, como ganchos ou torcidas, aumentam a aderência e a fricção e, conseqüentemente a carga de arrancamento das fibras (DE SOUZA, 2021 apud BENTUR e MINDESS, 1990).

1.4 Matriz do SHCC

Comparado ao concreto convencional, compósitos SHCC contêm consideravelmente maior teor de cimento (tipicamente duas a três vezes). O alto teor de cimento é consequência do controle da reologia do compósito para facilitar a dispersão das fibras e, mais essencialmente, controle da tenacidade da matriz, um

dos critérios que governam o comportamento *strain hardening* do compósito. Para alcançar tal comportamento, a tenacidade a fratura da matriz tem que ser controlada, tal que o comportamento de múltipla fissuração possa ocorrer antes que ocorra a ruptura ou arrancamento das fibras (MAGALHÃES, 2018).

Contudo, matrizes com altos teores de cimento comprometem os índices de sustentabilidade do material, além de comprometer características técnicas como, retração e calor de hidratação. Assim, são utilizadas adições minerais, como cinza volante, sílica ativa e escória de alto forno, que desempenham um papel fundamental no SHCC, contribuindo para suas propriedades mecânicas e comportamento de fissuração. Além disso, as adições minerais quando incorporadas ao compósito cimentício, são capazes de melhorar sua capacidade de absorver energia antes da falha, evitando a fratura abrupta quando submetido a forças de tração, sendo capaz de deformar-se plasticamente e absorver mais energia antes de se romper.

Outra característica de compósitos SHCC é a ausência de agregados graúdos, pois eles tendem a afetar adversamente o comportamento dúctil do compósito (MAGALHÃES, 2010). Agregados tipicamente ocupam uma importante fração volumétrica (60 - 80%) em materiais à base de cimento e, portanto, tem efeitos importantes sobre as diferentes propriedades dos materiais. Dentre elas podemos citar: a redução do custo do concreto, uma vez que os agregados aumentam o volume da massa de concreto, sem perda de resistência, e são mais baratos que o cimento; aumento da resistência ao desgaste abrasivo ou por erosão; diminuição da retração. Entretanto, na presença de fibras, a introdução de agregados em matriz cimentícia pode não conduzir a uma dispersão não uniforme das fibras. Geralmente, quanto maior o tamanho das partículas de agregado maior a aglomeração e interação das fibras (SOROUSHIAN, 1992).

Além disso, a presença de agregados em uma matriz cimentícia tende a modificar a tenacidade à fratura do compósito, modificando a sua superfície de fratura (PERDIKARIS e ROMEO, 1995). O aumento da tenacidade a fratura com o aumento do tamanho de partículas tem como resultado o aumento da resistência a propagação da fissura. Assim, apesar dos efeitos positivos dos agregados sobre a estabilidade dimensional e economia de materiais compósitos cimentícios reforçados com fibra, há limites de tamanho e volume de partículas de agregados para além do qual os problemas de dispersão da fibra, trabalhabilidade da mistura fresca e tenacidade da matriz podem começar a afetar negativamente as características do material

compósito. Por estas razões, a produção de misturas de SHCC foi restrita ao uso de um agregado fino, como areia microssilica (MAGALHÃES, 2010).

1.4.1 Cinza volante

A cinza volante, um subproduto da queima de carvão mineral em usinas termelétricas, é caracterizada por sua composição rica em partículas finamente divididas, que incluem sílica (SiO_2), alumina (Al_2O_3) e ferro (Fe_2O_3), além de quantidades variáveis de cálcio (CaO) e magnésio (MgO). Sua natureza fina e sua composição química a tornam um material versátil com propriedades reativas. Como afirma Mehta (2008), a cinza volante é uma pozolana altamente ativa, capaz de reagir com o hidróxido de cálcio presente no cimento Portland, formando produtos adicionais que melhoram a resistência e a durabilidade do concreto. Além disso, como destacado por Siddique e Singh (2011), a cinza volante possui um grande potencial como material de enchimento em compósitos cimentícios, contribuindo para melhorar a resistência à compressão, a durabilidade e a redução da permeabilidade, tornando-a uma escolha valiosa na indústria da construção civil. Sua aplicação em compósitos não apenas resulta em produtos finais de alto desempenho, mas também promove a sustentabilidade ambiental, aproveitando um subproduto industrial abundante (Mehta, 2008).

A introdução de cinza volante tornou-se o que alguns consideram uma componente necessária em misturas de SHCC. Segundo Wang e Li (2011), o seu uso tende a melhorar a robustez do comportamento na tração axial do compósito, mantendo a capacidade de deformação ao longo do tempo superior a 3%. Yang et al. (2007) citam ainda que o uso da cinza volante no compósito tende a reduzir a aderência química na interface fibra-matriz e a tenacidade da matriz, enquanto aumenta a aderência friccional. Além do que, o uso de cinza volante também contribui para a trabalhabilidade da mistura, conduzindo a uma boa dispersão e uniformidade das fibras. Diferentes teores de cinza volante tem sido incorporados em misturas de SHCC.

Wang e Li (2011) desenvolveram um SHCC com adição de cinza volante (até 1,2 vezes a massa do cimento) e encontraram um material com alta capacidade de

deformação (3 a 4%) e resistência a tração da ordem de 4,5MPa. Devido ao alto volume de cinza volante os índices de sustentabilidade do material, como emissão de dióxido de carbono e consumo de energia, foram significativamente melhorados. Já Yang et al. (2007) utilizaram altos teores de cinza volante (1,2 a 5,6 vezes a massa de cimento) e encontraram melhoria em muitas propriedades do SHCC como, redução da abertura de fissura, o que tornou a ductilidade na tração mais robusta, e redução da retração por secagem do SHCC. Os autores citam ainda que a tenacidade da matriz diminui de acordo com o aumento do teor de cinza volante, isso é esperado devido à menor reatividade das cinzas volantes quando comparada a do cimento.

1.4.2 Metacaulinita

A metacaulinita é um material obtido pela calcinação da caulinita, que é uma argila do grupo das alumino-silicatos. Uma de suas características é a presença de uma estrutura amorfa, que a torna altamente reativa em sistemas cimentícios. Como apontado por Sampaio e França (2018), a metacaulinita apresenta grande potencial como adição mineral em compósitos cimentícios. Sua incorporação em matrizes de cimento Portland pode melhorar as propriedades mecânicas, a durabilidade e a resistência química dos compósitos, tornando-os adequados para uma variedade de aplicações na construção civil. A pesquisa e o desenvolvimento contínuos têm destacado a importância da metacaulinita como um componente valioso em compósitos de cimento, beneficiando a indústria da construção com materiais de alto desempenho (SAMPAIO & FRANÇA, 2018).

Ao empregar a metacaulinita na formulação do SHCC, Santana e Magalhães (2022) constataram um significativo acréscimo na resistência à compressão das misturas entre os períodos de 7 e 28 dias, quando comparadas à mistura de referência. Adicionalmente, durante os testes de flexão, observou-se que o aumento no teor de metacaulinita nas misturas resultou em uma diminuição na deflexão de primeira fissura, na tensão de primeira fissura e na tensão máxima após a fissuração. A capacidade de deflexão aumentou até a relação MK/C igual a 1, e para teores mais elevados, a capacidade de deflexão foi reduzida. Segundo Ferreira (2016) o SHCC com metacaulinita desenvolve alta rigidez até a primeira fissura, e, posteriormente,

múltiplas fissuras são formadas até que o valor máximo de deformação à tração seja atingido.

1.5 Propriedades mecânicas

De maneira simplificada, o SHCC é definido como uma família de materiais e não apenas um único material, sendo o ECC, um dos compósitos mais conhecidos. Para um típico SHCC, sua resistência à compressão varia entre 20 MPa e 80 MPa e a capacidade de deformação na tração axial é entre 2% e 10% (ZHU *et al.*, 2022). Contudo, ao longo dos anos, diferentes versões do SHCC, com diferentes características foram desenvolvidos, as quais serão apresentadas abaixo.

1.5.1 Compressão

A curva tensão-deformação na compressão de um concreto convencional antes do pico se comporta como uma parábola, seguida por um decaimento linear íngreme da tensão na região pós-pico. Inicialmente, o SHCC se comporta de maneira semelhante ao concreto convencional, com uma região elástica seguida por uma região plástica. No entanto, em vez de atingir um ponto de ruptura abrupta, o SHCC continua se deformando.

Zhu et al. (2022) cita que, pela ausência do efeito estabilizador das fibras, a curva tensão-deformação do concreto não exhibe o ramo residual da curva presente no SHCC e o material pode romper de forma abrupta com uma deformação de, no mínimo, 0,35%. O comportamento pós-pico do SHCC sob compressão é dúctil e mostra significativa resistência residual bem além da deformação de 0,3%. Na carga de pico, as deformações normalmente variam de 0,25% a 0,6%, dependendo da resistência à compressão e da aderência fibra/matriz, com uma capacidade de carga residual significativa até 1% da tensão máxima.

Zhu et al. (2022) apontam que o SHCC é considerado de baixa resistência, quando o mesmo apresenta resistência à compressão entre 10 e 30 MPa, e de resistência normal (do inglês, *normal-strength ECC*, NS-ECC) quando a resistência varia entre 40 e 80 MPa, os quais são utilizados na maioria das aplicações estruturais. Segundo Li (2019), SHCC com resistência à compressão entre 80 e 150 MPa é classificado como ECC de alta resistência (do inglês, *high-strength ECC*, HS-ECC), já o ECC com ultra-alta resistência (do inglês, *ultra-high-strength ECC*, UHS-ECC) possuem resistência superior a 150 MPa e são utilizados em aplicações mais específicas, como resistência ao impacto e à explosão.

Li (2019) enfatiza que a variação na resistência à compressão de amostras pertencentes ao mesmo lote de SHCC é baixa, com coeficientes de variações relatados tipicamente inferiores a 5% e muito raramente superiores a 10%.

A resistência à compressão do SHCC é dependente de sua idade, conforme observado na Figura 9, a sua resistência à compressão aumenta até a idade de 14 dias (por conta da hidratação primária do cimento e secundária das adições minerais utilizadas nas misturas), após isso a taxa de ganho de resistência diminui e um platô relativo é alcançado além de 90 dias (LI, 2019). Logo, pode-se concluir que a resistência à compressão está diretamente relacionada com a taxa de hidratação dos ingredientes cimentícios do SHCC.

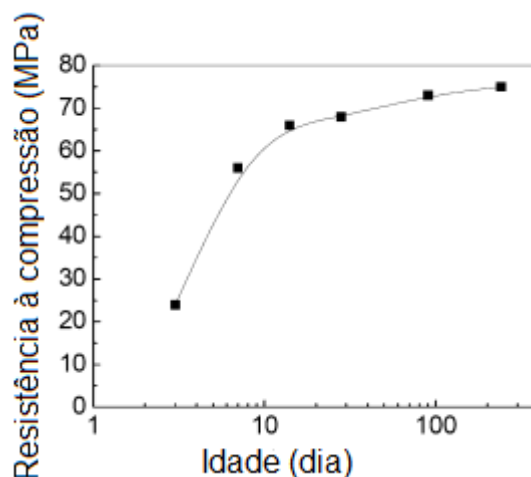


Figura 9 - Desenvolvimento da resistência à compressão do SHCC de acordo com a idade (LI, 2019).

Em 2008, Kamal *et al.* (2008) relataram um HS-ECC com uma resistência à compressão de 96 MPa e uma capacidade de deformação na tração de 3,3% na idade de cura de 14 dias. Mais tarde, o ECC de ultra alta resistência (UHS-ECC) foi desenvolvido com uma resistência à compressão de 205 MPa e uma capacidade de deformação na tração de 4,6% (RANADE, 2014). Em 2018, a capacidade de deformação na tração do HS/UHS-ECC foi melhorada para 8% com múltiplas fissuras (YU *et al.*, 2018). Mais recentemente, Huang *et al.* (2022) propuseram uma abordagem de projeto com reforço híbrido no desenvolvimento de um UHS-ECC. Os autores usaram uma combinação de fibras de polietileno (PE) com o objetivo de aumentar a ductilidade na tração, e fibras de aço, para o controle da abertura de fissuras e melhoria da resistência. Com essa abordagem, os autores conseguiram um UHS-ECC com uma resistência à compressão de 211 MPa e uma capacidade de deformação na tração de 6,3%. Esse compósito registrou a maior resistência à compressão e o melhor desempenho geral até o momento (ZHU *et al.*, 2022).

A Figura 10 ilustra as faixas de resistência à compressão e capacidade de deformação na tração do SHCC conforme relatado na literatura existente.

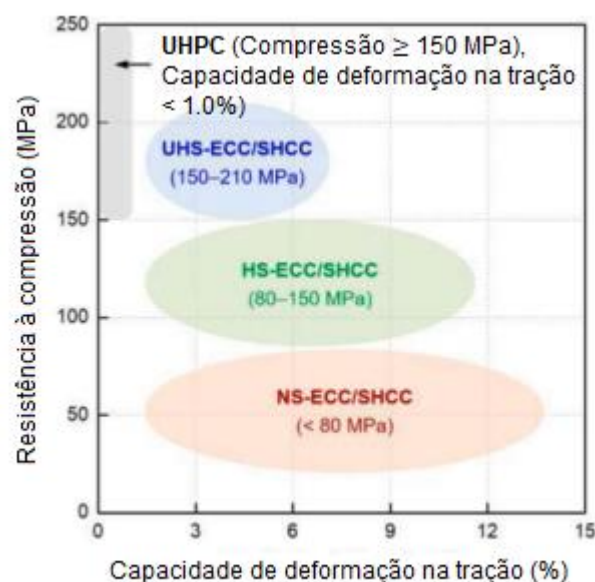


Figura 10 - Relação entre a resistência à compressão e capacidade de deformação de diferentes tipos de SHCC (Adaptado de ZHU *et al.*, 2022).

Entre os três tipos de SHCC, UHS-ECC tem o maior módulo de elasticidade e a maior deformação na carga de pico. Em termos de forma de curva, NS-ECC exibe

uma parte ascendente linear abaixo dos 40-50% da tensão de pico (LI, 2019), enquanto que, com o aumento da resistência, tal limite de tensão aumenta. UHS-ECC exhibe uma porção ascendente linear até cerca de 80% da tensão de pico, antes da ocorrência de microfissuras (RANADE *et al.*, 2013). Na região pós-pico, a tensão de NS-ECC diminui moderadamente, devido à transferência de tensão promovida pelas fibras. Para HS/UHS-ECC, no entanto, a queda de tensão ocorre de forma mais abrupta, indicando uma natureza mais frágil para o HS-ECC, comparado aos outros SHCCs.

1.5.2 Flexão

O comportamento de flexão do SHCC é normalmente determinado usando o teste de flexão em quatro pontos (LI, 2019), onde duas cargas são aplicadas no terço médio do vão do corpo de prova, fornecendo um momento constante no terço médio do corpo de prova. Espera-se que a resistência à flexão do SHCC seja independente do tamanho do corpo de prova, no entanto uma variação pode ocorrer devido às mudanças na orientação das fibras curtas causadas pelas dimensões do corpo de prova.

A Figura 11 mostra uma resposta típica de flexão de um SHCC reforçado com fibras de PVA. De acordo com Li (2019), a tensão de flexão continua a aumentar mesmo após o início da fissuração no corpo de prova. Este comportamento é chamado de endurecimento na flexão (em inglês, *deflection hardening*) e caracteriza o comportamento típico de um SHCC.

A resistência à flexão aumenta com a idade, mas a deflexão máxima, medida na carga máxima é reduzida, isso é consistente com o aumento da resistência à tração direta e diminuição da capacidade de deformação à tração com a idade (LI, 2019). Para um SHCC, o endurecimento por deflexão é garantido, independente das dimensões da viga.

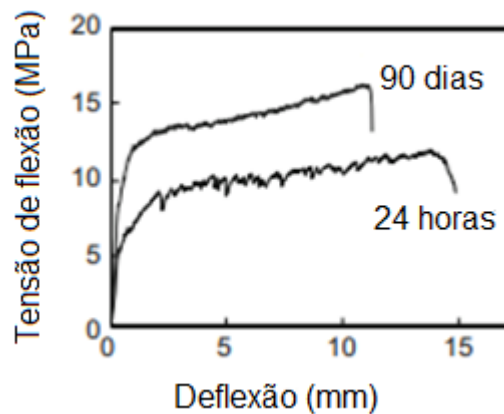


Figura 11 - Comportamento tensão vs. deflexão de vigas PVA-SHCC em duas idades diferentes (LI, 2019).

1.5.3 Tração direta

A curva tensão-deformação do SHCC obtida pelo ensaio de tração direta é representada na Figura 12. Na curva, a tensão de tração no interior do compósito aumenta linear-elasticamente até atingir o limite elástico (EL), cujo ponto é inferior a resistência à primeira fissura (σ_{fc}). À medida que a tensão de tração atinge σ_{fc} uma microfissura se propaga instantaneamente por toda a seção transversal do corpo de prova, isso causa diminuição na tensão de tração, pois a capacidade de transferência de carga é, repentinamente, perdida. Porém a capacidade de transferência de tensão pelas fibras ajuda na recuperação da tensão de tração até que outra microfissura apareça na matriz do compósito. A tensão de tração máxima é chamada de resistência pós-fissuração, ou resistência à tração (σ_{ult}) e o valor de tensão correspondente é chamado de capacidade de deformação na tração (ϵ_{ult}).

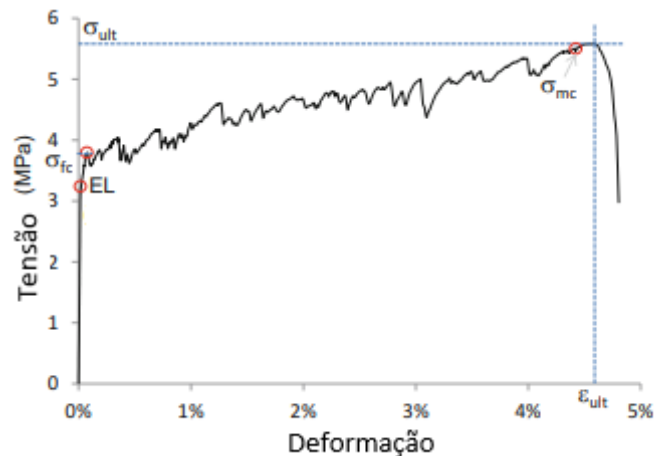


Figura 12 - Típica curva tensão-deformação de SHCC (Adaptado de LI, 2019).

Li (2019) destaca que o comportamento tensão-deformação de tração do SHCC é dependente da idade. A mudança na capacidade de deformação é dependente da tenacidade à fratura da matriz e interação fibra/matriz, sendo ambas influenciadas pelo tempo de hidratação.

Sob tração direta, o SHCC exhibe comportamento dúctil com deformações superiores a 4%, formação de múltiplas microfissuras (menores que 100µm de abertura) e espaçamento médio no nível de saturação igual a 2mm (WANG e LI, 2011; LI, 2019). A abertura de fissuras é limitada pela resistência ao arrancamento das fibras. Devido a este fenômeno, surgem outras fissuras que distribuem a deformação por tração, o que distingue o comportamento deste material de outros compósitos, que concentram toda a deformação na abertura de uma única fissura.

A formação de micro fissuras de pequenas aberturas faz com que SHCC seja um material que, mesmo fissurado pode ser resistente às ações ambientais resultando num material de alta durabilidade (LI, 1997), tendo em vista que a permeabilidade a água, somente aumenta de forma significativa, com abertura de fissuras maiores que 100µm (LEPECH e LI, 2005; BENTUR e MITCHELL, 2008).

1.6 Resistência à abrasão e erosão

Cheng *et. al.* (2014) analisaram a influência de fibras de aço e sílica ativa na deterioração do concreto por meio do ensaio de abrasão Los Angeles e testes de abrasão com água. Nos testes em questão foi usado Cimento Portland do tipo I, sendo substituído parcialmente em 5% por sílica ativa. A proporção água/material cimentício ficou entre 0,35 e 0,55. O concreto com maior fator a/mc (0,55) experimentou a maior perda de volume em ambos os testes, uma vez que a resistência à abrasão parece aumentar proporcionalmente à resistência à compressão, que por sua vez é inversamente proporcional ao fator a/mc, portanto a inclusão de fibra de aço em concreto com alta relação água/material cimentício não apresenta tanta melhora em propriedades abrasivas devido à baixa resistência à. A adição de sílica ativa em compósitos cimentícios reforçados com fibra de aço contendo relações água/aglomerante 0,35 e 0,55 melhorou a resistência à abrasão, à compressão e à tração aos 28 dias.

Sallal *et. al.* (2018) ensaiaram corpos de prova cilíndricos de SHCC para avaliar a resistência à abrasão por erosão deste material usando a norma ASTM C 1138M (1999). As amostras foram divididas em 2 grupos: o primeiro com 15 corpos de prova totalmente moldados com SHCC e no segundo grupo, 9 corpos de prova foram moldados com concreto convencional e cobertos com uma camada de espessuras de 1, 2 e 3 cm de SHCC, com o objetivo de avaliar a espessura de SHCC, quando usado como camada de reparo superficial em concretos. O primeiro grupo foi ensaiado em idades de 3, 7 e 28 dias, com teores de PVA de 0%, 0,5%, 1,0%, 1,5% e 2,0%. A duração dos testes foi de 72h. Em geral, o uso de teores de fibras de PVA superior a 0,5% em volume levou a um aumento da resistência à abrasão. Com base na mistura com 2% de PVA, investigou-se o efeito da espessura da camada de recobrimento do concreto com SHCC na resistência à abrasão. Concluiu-se que 1 cm de espessura de cobertura de SHCC não é adequado para proteger o concreto da abrasão durante as primeiras idades, pois a camada de SHCC foi completamente desgastada, bem como os grãos da brita usada no concreto após 48 horas de ensaio de abrasão.

Sallal *et. al.* (2018) estudaram a influência de abrasão na superfície do SHCC em estruturas hidráulicas, que são construções submersas ou parcialmente submersas projetadas para serem operacionais por longos períodos de tempo. O

impacto direto da água e dos materiais na água, como a areia e o cascalho, nessas superfícies foi simulado experimentalmente usando o método do jato de água. Para tanto, uma máquina de ensaio de abrasão foi especialmente fabricada e amostras de SHCC com dois tipos de fibras foram testadas. Quatro teores de fibra de PVA e polipropileno de 0,5%, 1,0%, 1,5% e 2,0% foram consideradas. As amostras foram testadas em três idades diferentes de 3, 7 e 28 dias para avaliar o efeito da idade. Foram investigados cinco ângulos de impacto do jato d'água em relação ao corpo de prova ensaiado de 15°, 30°, 45°, 60° e 90°. A inclusão de fibras de polipropileno e PVA conduziu a uma melhor resistência à abrasão, devido à maior resistência à tração. Em relação à idade, ficou evidente que os corpos de prova com 28 dias de idade apresentaram maior resistência à abrasão que os corpos de prova aos 3 e 7 dias. Os resultados também indicaram que para teores de 1% e 2% de PP, à medida que o ângulo de inclinação aumenta, em geral, as perdas por abrasão diminuem, todavia o valor de abrasão foi maior no ângulo de 60° quando comparado com o de 45°. O autor concluiu que o uso de sílica ativa e maiores quantidades de cinzas volantes tem um efeito significativo nas propriedades do SHCC. Esses ingredientes também podem ter um impacto perceptível na resistência à abrasão.

Mohamed *et. al.* (2018) estudaram a capacidade de absorção de energia por cargas de impacto e a resistência à abrasão superficial de compósitos do tipo SHCC reforçados com fibras de polipropileno com 13 mm de comprimento (PE13), PVA com 8 mm (PVA8) e 12 mm (PVA12) de comprimento, e fibras de aço com 13 mm (SF13) de comprimento. Os resultados dos testes foram comparados com o concreto convencional. A resistência à abrasão dos compósitos foi avaliada por meio do teste do cortador rotativo ASTM C944 (2019) e jato de areia ASTM C418 (2020). De maneira geral, a resistência à abrasão do SHCC é mais satisfatória quando comparada ao concreto convencional, isso se deve ao papel das fibras em aumentar a resistência à tração e à fissuração do compósito.

Comparando-se os resultados obtidos em ambos os ensaios de abrasão, pode-se observar que o ensaio do cortador rotativo foi mais efetivo sobre os efeitos das fibras na melhoria da resistência à abrasão do SHCC. Os resultados podem ser atribuídos ao fato de que no teste de jateamento, a areia movida a alta pressão de ar aponta perpendicularmente à superfície e remove progressivamente as partículas de areia e produtos da hidratação ao redor das fibras, o que reduz a eficiência das fibras no aumento da resistência e controle da fissuração do compósito. Os testes de abrasão

com cortador rotativo e jateamento indicaram que o uso de PE13 não melhora a resistência à abrasão do SHCC em relação ao concreto convencional, por outro lado, o uso de PVA8 e PVA12 pode melhorar sensivelmente a resistência à abrasão. Os resultados de ambos os testes também indicaram que a maior melhoria na resistência à abrasão pode ser alcançada quando o SF13 é usado no SHCC. Tanto no ensaio de cortador rotativo quanto no de jateamento, a mistura de concreto convencional apresentou melhor resistência à abrasão do que o ECC-PE13, ECC-PVA8 e ECC-PVA12, consequência de sua maior ductilidade. No entanto, SHCC com SF13 apresentou melhor resistência à abrasão em comparação com o concreto convencional, em razão da alta rigidez do aço permitir que as fibras combinadas com a argamassa formem um meio mais rígido contra o desgaste.

Em outro estudo, Mohamed *et. al.* (2019) estudaram a resistência à abrasão de misturas de SHCC auto adensáveis reforçadas com fibras de PVA (8 mm de comprimento) e com diferentes tipos de materiais cimentícios (cinza volante, escória, sílica ativa e metacaulinita) e areia (microssílica, areia de granito britada e areia de granito). A resistência à abrasão foi avaliada usando o método do cortador e do jato de areia. Os dois testes mostraram que o aumento da resistência à compressão do compósito resultou em maior resistência à abrasão superficial. Os autores indicaram uma maior resistência à abrasão em blendas com 30% escória + 10% cinza volante, 10% sílica ativa + 45% cinza volante e 20% metacaulinita + 35% cinza volante. Fazendo um comparativo, apesar do diferente teor de cinza volante, observou-se que a mistura com 20% de metacaulinita apresentou a maior resistência à compressão aos 28 dias e menor desgaste por abrasão entre todas as misturas. A troca de areia de sílica por areia britada não promoveu mudanças na resistência à abrasão.

2 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL

2.1 Introdução

A primeira etapa da pesquisa visa avaliar o impacto do uso de diferentes teores de blendas de cinza volante com metacaulinita, nas propriedades físicas e mecânicas de compósitos cimentícios do tipo SHCC. Nesta fase também foram utilizadas duas misturas, com somente cinza volante e diferentes teores de água (CV1 e CV2). Esse estudo preliminar é de grande importância, uma vez que a obtenção de compósitos cimentícios com elevada capacidade de deformação depende fortemente dos materiais constituintes nos compósitos. Para uma melhor análise dos resultados, também foram realizados ensaios nas matrizes dos compósitos. Para melhor análise dos dados também foram realizados ensaios físicos e mecânicos nas matrizes dos compósitos.

Na segunda etapa do estudo foram realizados os ensaios de erosão em compósitos e nos compósitos aplicados como uma camada de reparo em substratos de concreto. Os ensaios de erosão nos compósitos foram realizados somente nas misturas com somente cinza volante (CV1 e CV2). As outras misturas desenvolvidas foram testadas como material de reparo. Este estudo teve o objetivo de verificar a influência do teor de metacaulinita e cinza volante no desempenho dos compósitos quando submetidos ao desgaste por erosão. Para uma melhor compreensão dos resultados encontrados, também foram realizados ensaios de dureza superficial nos compósitos. As Figuras 13 e 14 apresentam um esquema geral dos estudos realizados nos compósitos, matrizes dos compósitos e conjuntos reparados.

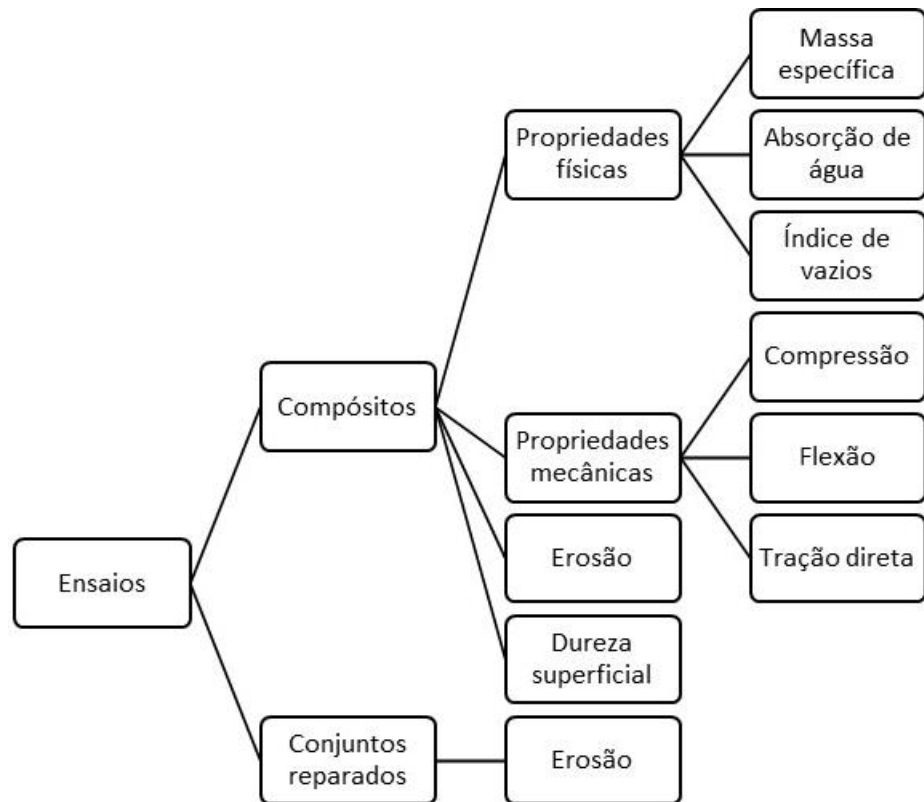


Figura 13 – Esquema dos ensaios realizados nos compósitos e conjuntos reparados.

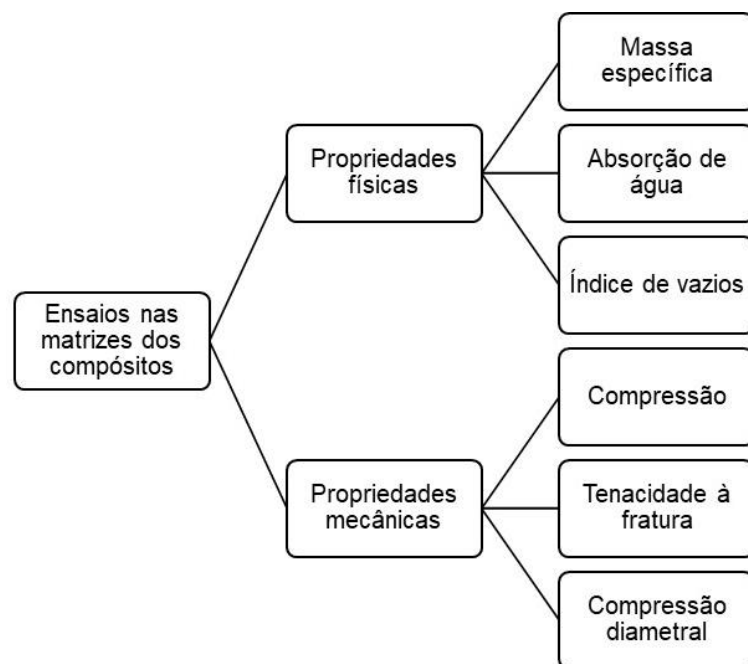


Figura 14 – Esquema dos ensaios realizados nas matrizes dos compósitos.

2.2 Materiais utilizados na fabricação do concreto

2.2.1 Cimento

Foi utilizado cimento CP II-F, com 32 MPa de resistência. A massa específica do cimento de 3,03 g/m³ foi determinada pelo procedimento da NBR 16605 (2017). O módulo de finura de 0,64 foi determinado pela NBR 11579 (2012). Os óxidos presentes no cimento são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 – Óxidos presentes no cimento. (SANTANA e MAGALHÃES, 2022)

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
Cl (%)	0,213 ± 0,007
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.

2.2.2 Areia

Foi utilizada, na fabricação do concreto, areia natural de rio lavada como agregado miúdo. A areia apresenta um diâmetro máximo de 4,75 mm, módulo de finura igual a 2,31 e massa específica de 2,7 g/cm³. A curva granulométrica, mostrada na Figura 15, foi determinada segundo a norma NBR NM 248 (2003) e a massa específica segundo a norma NBR NM 52 (2009).

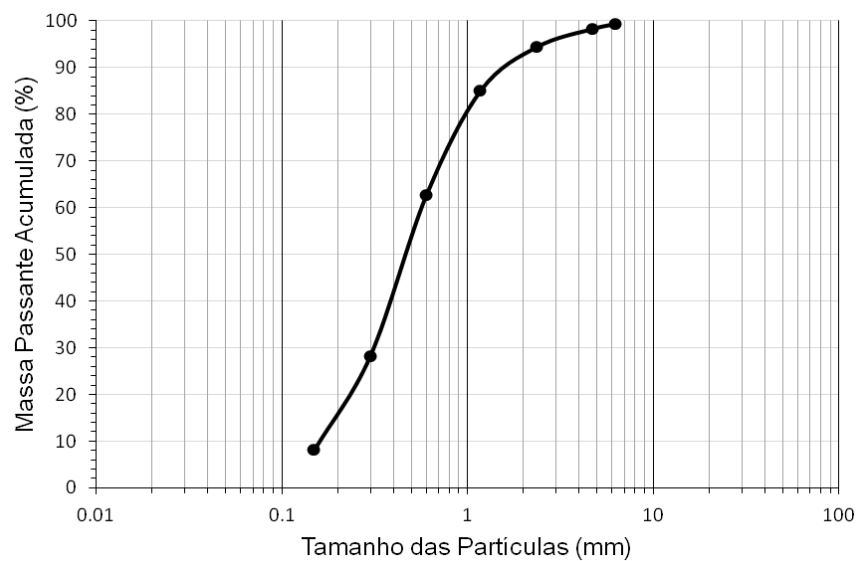


Figura 15 - Curva granulométrica do agregado miúdo.

2.2.3 Brita

A brita utilizada tem massa específica de 2,7 g/cm³ e diâmetro máximo de 19 mm. A massa específica foi determinada segundo a norma NBR NM 53 (2009) e a granulometria (Figura 16) conforme a NBR NM 248 (2003).

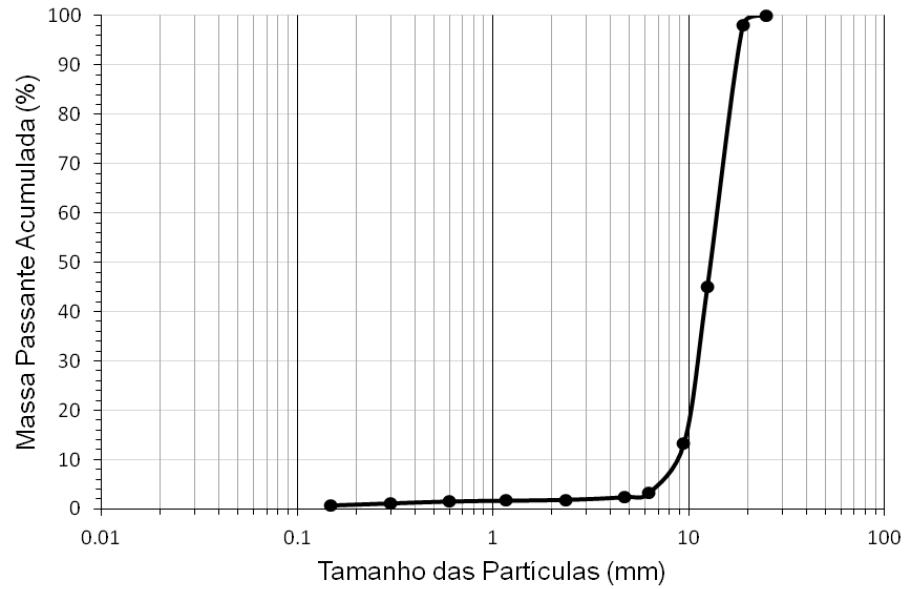


Figura 16 - Curva granulométrica do agregado graúdo.

2.2.4 Água

A água utilizada é de origem das instalações hidráulicas do Laboratório de Engenharia Civil da UERJ, e é fornecida pela rede pública de abastecimento da cidade do Rio de Janeiro.

2.3 Materiais utilizados na fabricação dos compósitos

2.3.1 Cimento

Foi utilizado o mesmo cimento utilizado no concreto.

2.3.2 Cinza volante

Foi utilizada uma cinza volante fornecida pela Pozo fly. A cinza possui uma massa específica de 2,10 g/cm³ e índice de finura na peneira de 45 µm igual a 16,40%. O índice de atividade pozolânica da cinza volante com o cimento, determinado pelo procedimento da NBR 5752 (2014) é igual a 85,65%. A composição química das cinzas, apresentada na Tabela 2, foi determinada por espectrometria de fluorescência de raios X, com o equipamento Shimadzu EDX-720.

Tabela 2 - Composição química da cinza volante (VITAL e MAGALHÃES, 2022)

Componentes da cinza volante	Teor (%)
Al ₂ O ₃	32,24
SiO ₂	53,64
SO ₃	1,66
K ₂ O	3,48
CaO	1,97
Fe ₂ O ₃	5,48
TiO ₂	1,33

2.3.3 Metacaulinita

Foi utilizada uma metacaulinita industrializada, do tipo HP Ultra, fabricada pela empresa Metacaulim do Brasil Industria e Comércio Ltda, com índice de atividade pozolânica com o cimento, determinado pelo procedimento da NBR 5752 (2014), igual a 111,6%. Possui uma massa específica de 2,69 g/cm³ e índice de finura na peneira de 45 µm igual a 9,75%, determinada pela NBR 15894 (2010). Na Tabela 3 é possível encontrar a composição química da metacaulinita.

Tabela 3 – Composição química da metacaulinita.

Compostos	Quantidade (%)
Al ₂ O ₃ (%)	27,14 ± 0,05
SiO ₂ (%)	67,42 ± 0,07
P ₂ O ₅ (%)	0,49 ± 0,05
SO ₃ (%)	ND
Cl (%)	0,359 ± 0,002
CaO (%)	0,28 ± 0,02
TiO ₂ (%)	1,95 ± 0,02
Fe ₂ O ₃ (%)	2,14 ± 0,02
K ₂ O (%)	0,0352 ± 0,0007
SrO (%)	0,00365 ± 0,00002
Outros (%)	0,184

ND – Não detectado.

2.3.4 Areia

Na fabricação dos compósitos foi usada areia natural passante na peneira de 300 µm, com massa específica de 2,64 g/cm³, de acordo com NBR NM 52 (2009). A curva granulométrica (Figura 17) foi determinada utilizando-se a NBR NM 248 (2003).

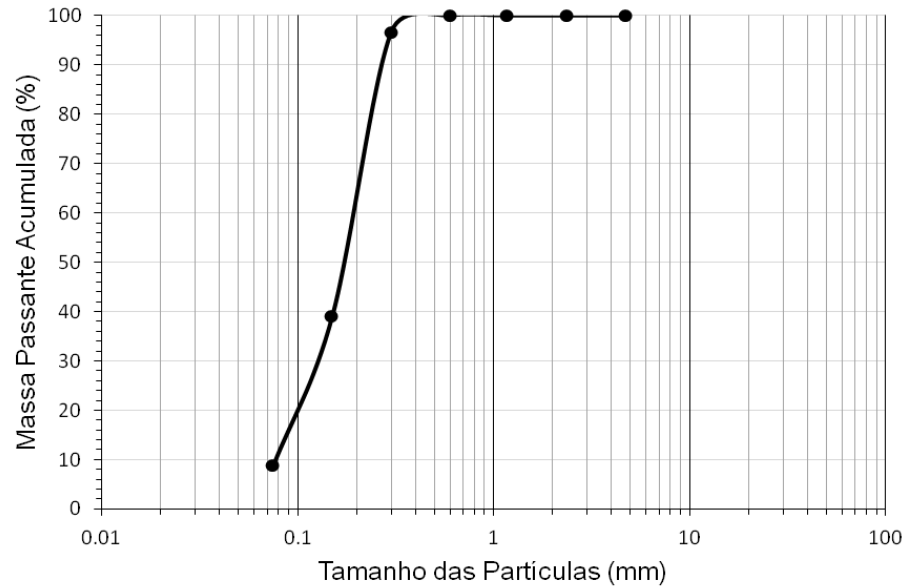


Figura 17 - Curva granulométrica da areia natural.

2.3.5 Superplastificante

Na composição dos compósitos foi utilizado o Superplastificante (SP) Glenium 51 da BASF, baseado em uma cadeia de éter policarboxílico modificado com uma massa específica de $1,1 \text{ g/cm}^3$ e o teor de sólidos igual a 27%.

Para a determinação do ponto de saturação do superplastificante foi utilizado o ensaio do funil de Marsh. Para o ensaio foi utilizada uma pasta de cimento e cinza volante na proporção de 1:1,2 e a/mc 0,32 e outra pasta de cimento e metacaulinita na proporção de 1:1 e a/mc de 0,46. O ensaio consiste na medição do tempo para o escoamento de 1 litro de pasta pelo funil de Marsh, de acordo com a NBR 7682 (2013). Ao se variar a porcentagem do SP na mistura, o tempo de escoamento foi reduzindo à medida que ele ainda está realizando o seu papel de defloculação e dispersão das partículas. No momento em que o tempo de escoamento não é mais reduzido significa que já foi atingido o ponto de saturação do SP. As medições do tempo de escoamento foram feitas após 5 e 10 minutos da colocação do SP na mistura com cinza volante e 5, 10 e 20 minutos da colocação do SP na mistura com metacaulinita.

O teor de sólidos no ponto de saturação para cada mistura é indicado nos gráficos tempo de escoamento vs teor de SP, em função da massa de material

cimentício, mostrados na Figura 18. A Figura 18a mostra o gráfico obtido para a mistura de cimento com cinza volante, e a Figura 18b mostra o gráfico da mistura de cimento com metacaulinita. No ensaio foi verificado que o ponto de saturação do SP na mistura com cinza volante é igual a 1,20% de SP, ou seja, 0,32% do teor de sólidos do SP, e da mistura com metacaulinita é 2,60% de SP, ou seja 0,70% do teor de sólidos.

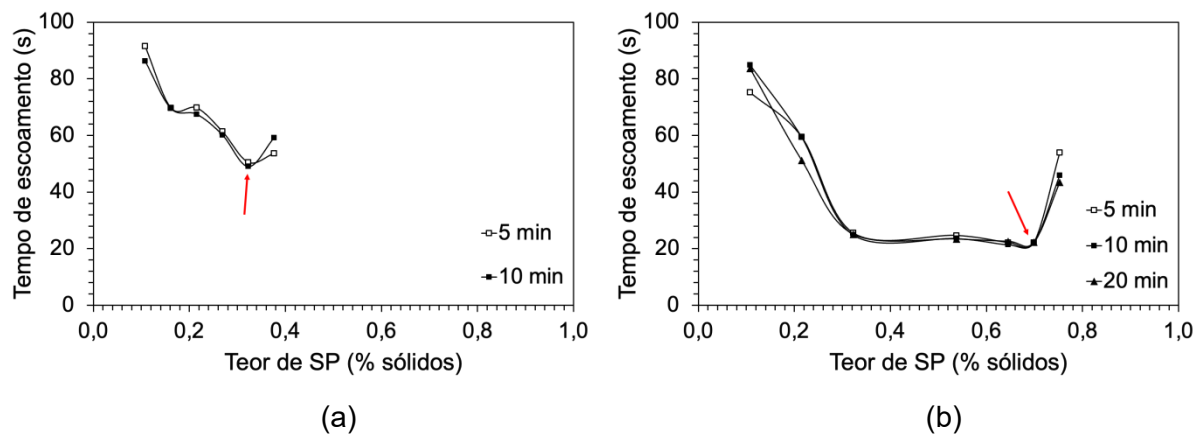


Figura 18 - Gráfico tempo de escoamento versus teor de superplastificante (SP) das pastas fabricadas com (a) cimento e cinza volante e (b) cimento e metacaulinita.

2.3.6 Água

A água utilizada é a mesma utilizada na fabricação do concreto.

2.3.7 Fibra

Como reforço dos compósitos foi utilizada a fibra de álcool polivinílico (PVA) fabricada pela Kuraray Co, Japão, com 12 mm de comprimento. As propriedades físicas e mecânicas da fibra são listadas na Tabela 4, retiradas dos dados do fabricante.

Tabela 4 – Propriedades 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 a tração (MPa)	1560
Alongamento (%)	6,5

2.4 Moldagem do concreto

Para a fabricação do substrato de concreto, foi utilizado um concreto com resistência à compressão de 30 MPa. O concreto foi fabricado com o traço de 1:1,82:2,22 e fator água/material cimentício (a/mc) de 0,46. As quantidades dos materiais utilizados estão expressas na Tabela 5.

Tabela 5 – Quantidade de materiais utilizados na moldagem do concreto.

Material	Quantidade (kg/m^3)
Cimento	2263,54
Areia	3806,51
Brita	5025,05
Água	1358,12

Para a fabricação do concreto foi utilizada uma betoneira de 100 litros. Depois de todos os materiais separados, foi colocada a brita e metade da água na betoneira. Após isso a betoneira foi ligada para misturar os materiais já inseridos, por aproximadamente 1 minuto, após esse tempo foi colocado o cimento, a areia e a outra metade da água. Após a inserção de todos os materiais, os mesmos foram misturados por mais 3 a 4 minutos até a homogeneização da mistura.

Antes de iniciar o processo de moldagem, foi utilizado desmoldante em todas as formas para facilitar as desmoldagens. Os substratos de concreto, para os ensaios de erosão, foram moldados em formas circulares normatizados pela ASTM C 1138 (2019), com diâmetro de 30 cm e altura de 10 cm. No entanto, foram utilizados discos de isopor, com 2,5 cm de espessura, no fundo da forma para que os substratos tivessem 7,5 cm de altura, como representado na Figura 19. A Figura 20 mostra a mistura de concreto fresca nas formas.

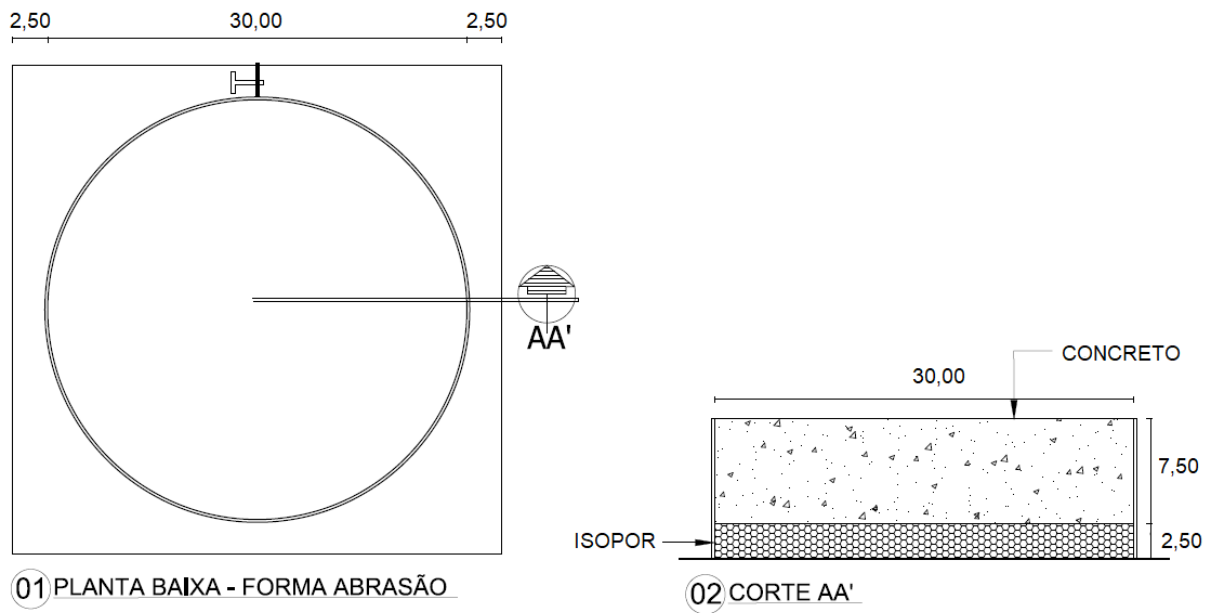


Figura 19 – Representação do molde utilizado para moldar o substrato de concreto empregado nos ensaios de erosão.

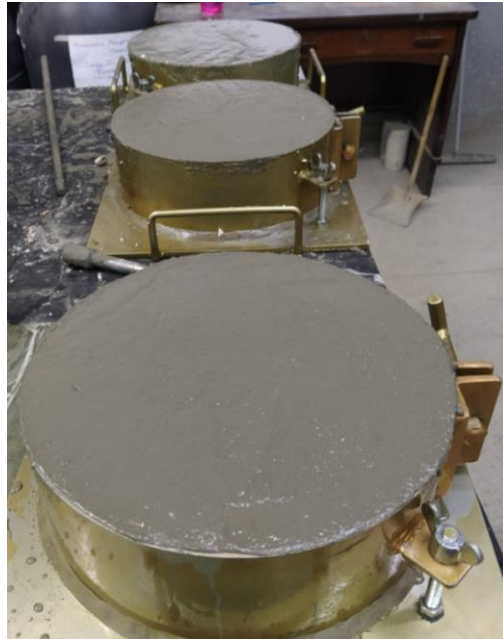


Figura 20 – Moldagem do substrato de concreto com o isopor no fundo da forma.

Além dos substratos, foram moldados também corpos de prova cilíndricos com 10 cm x 20 cm utilizados para os ensaios de compressão, módulo de elasticidade, absorção de água, porosidade e massa específica.

O adensamento da mistura nas formas foi feito com ajuda de uma haste metálica e logo após rasada a superfície. Com 1 dia de moldagem, os corpos de prova de concreto foram desmoldados e colocados em água com cal por 28 dias, para o processo de cura.

2.5 Moldagem dos compósitos, matriz e reparo do concreto

Com o objetivo de analisar o impacto de misturar cinza volante e metacaulinita no desempenho do compósito cimentício reforçado com fibras de PVA, foi estabelecida a confecção de 6 misturas com diferentes teores de cinza volante e metacaulinita. As proporções de areia/material cimentício (0,36) e água/material cimentício (0,34) são iguais em todas as misturas.

A mistura MC50 foi desenvolvida por Santana e Magalhães (2022) com o objetivo de estudar a influência do uso da metacaulinita nas propriedades mecânicas de um SHCC. Ela contém somente cimento (50%) e metacaulinita (50%) como materiais cimentícios na matriz. As misturas MC40CV10, MC30CV20, MC20CV30, MC10CV40 e CV50 foram obtidas pela redução gradual em massa do teor de metacaulinita e aumento do teor de cinza volante. Assim, as misturas MC40CV10, MC30CV20, MC20CV30, MC10CV40 e CV50 contém os seguinte teores de metacaulinita + cinza volante: 40% + 10% (MC40CV10), 30% + 20% (MC30CV20), 20% + 30% (MC20CV30), 10% + 40% (MC10CV40) e 0% + 50% (CV50). O teor de cimento é o mesmo (50%) em todas as misturas.

A mistura CV1 possui somente cinza volante e cimento, como material cimentício. Essa é uma mistura típica de um SHCC e que tem sido intensivamente estudada por diversos autores. A mistura CV2 foi obtida pela redução do fator a/mc da mistura CV1, com o objetivo de aumentar a resistência à compressão do compósito e, teoricamente, aumentar a resistência à abrasão. O teor de superplastificante (SP) foi dosado para proporcionar adequada trabalhabilidade das misturas, com índice de consistência, medido pela NBR 13276 (2016), entre 220 e 280 mm. As proporções dos materiais utilizados nas misturas são apresentados na Tabela 6 e, as quantidades em kg/m^3 dos materiais, estão expressas na Tabela 7.

Tabela 6 - Proporções de materiais dos compósitos.

Misturas	Tipo de adição	C ¹	MK ²	CV ³	areia/mc ⁴	a/mc ⁵	SP/mc ⁶ (%)	PVA ⁷ (%)
MC50	MK	0,5	0,5	-	0,36	0,34	2,6	2,00
MC40CV10	MK e CV	0,5	0,4	0,1	0,36	0,34	2,2	2,00
MC30CV20	MK e CV	0,5	0,3	0,2	0,36	0,34	1,4	2,00
MC20CV30	MK e CV	0,5	0,2	0,3	0,36	0,34	0,90	2,00
MC10CV40	MK e CV	0,5	0,1	0,4	0,36	0,34	0,75	2,00
CV50	CV	0,45	-	0,55	0,36	0,34	0,45	2,00
CVCV1	CV	0,45	-	0,55	0,36	0,31	0,80	2,00
CV22	CV	0,45	-	0,55	0,36	0,27	1,20	2,00

¹C: cimento, ²MK: metacaulinita, ³CV: cinza volante, ⁴areia/mc: areia/ material cimentício ⁵a/mc:

água/material cimentício, ⁶SP/mc: superplastificante/material cimentício e ⁷PVA: fibras de PVA.

Tabela 7 - Quantidade de materiais utilizados na moldagem dos compósitos (kg/m³).

Misturas	C ¹	MK ²	CV ³	Areia	Água	SP	PVA ⁴
MC50	599,99	599,99	0,00	431,99	412,79	31,20	26,00
MC40CV10	592,56	474,05	118,51	426,64	407,68	26,07	26,00
MC30CV20	585,32	351,19	234,13	421,43	402,70	16,39	26,00
MC20CV30	578,25	231,30	346,95	416,34	397,83	10,41	26,00
MC10CmV40	571,34	114,27	457,08	411,37	393,08	8,57	26,00
CV50	564,61	0,00	564,61	406,52	388,45	5,08	26,00
CVCV1	528,41	0,00	634,09	418,50	362,70	9,30	26,00
CV2	555,53	0,00	666,64	439,98	329,99	14,67	26,00

¹C: cimento, ²MK: metacaulinita, ³CV: cinza volante e ⁴PVA: fibras de PVA.

A confecção dos compósitos iniciou com a separação e pesagem dos materiais, posteriormente, os materiais secos (cimento, areia, metacaulinita e cinza volante) foram misturados de acordo com a necessidade de cada mistura, até sua homogeneização. Após este procedimento metade da mistura seca foi colocada na argamassadeira e com ela acrescentada, aproximadamente, 60% da água, e os ingredientes foram misturados por cerca de 2 minutos.

Com a argamassadeira ligada foi adicionado todo o SP previamente misturado com cerca de 20% de água, e os ingredientes misturados por, aproximadamente, 4 minutos até a ativação do mesmo. Em seguida a outra metade dos secos e o restante da água foram adicionados até a homogeneização total. Em seguida, foram adicionadas as fibras, aos poucos para que não houvesse a formação de grumos na mistura (Figura 21), evitando assim, efeito negativo em sua homogeneidade. Todo esse procedimento explicitado durou de 10 a 12 minutos por mistura.



Figura 21 – Materiais após processo de mistura na argamassadeira.

Os corpos de prova para caracterização foram moldados em formas cilíndricas para a realização dos ensaios de compressão axial e massa específica, placas retangulares para a realização dos ensaios de flexão, e os chamados “ossos de cachorro” para os ensaios de tração direta (Figura 22) e corpos de prova cúbicos para o ensaio de dureza superficial.



Figura 22 – Formas para moldagem dos ensaios de (a) compressão, (b) flexão e (c) tração direta.

Já os corpos de prova para os ensaio de erosão foram feitos nas formas circulares normatizados pela ASTM C 1138 (2019), tendo 30 cm de diâmetro e 10 cm

de altura, enquanto os de dureza foram moldados em corpos de prova cúbicos com 10 cm de aresta. Os corpos de prova inteiros (com 30 cm de diâmetro e 10 cm de altura) foram fabricados somente com as misturas CV1 e CV2, como mostrados na Figura 23.



Figura 23 – Moldagem de compósitos para ensaio de erosão.

Antes de iniciar as moldagens foi utilizado desmoldante para facilitar a retirada do corpo de prova da forma. O adensamento das misturas nas formas foi feito com ajuda de uma haste metálica, e após a finalização, a superfície foi rasada. Após a moldagem, os corpos de prova foram colocados sobre uma superfície horizontal e protegidos da perda de umidade. Os corpos de prova foram desmoldados após 24 h e colocados submersos em água com cal por 28 dias para o processo de cura, como mostra a Figura 24.



Figura 24 – Processo de cura dos compósitos.

2.5.1 Moldagem do reparo do concreto

As misturas MC50, MC40CV10, MC30CV20, MC20CV30, MC10CV40 e CV50 foram utilizadas como uma camada de reparo no substrato de concreto, os quais foram moldados para os ensaios de erosão. Para a moldagem das camadas de reparo, primeiramente foi passado o desmoldante nas formas circulares, com 30 cm de diâmetro e 10 cm de altura. Em seguida, foram colocados os discos de concreto, com 30 cm de diâmetro e 7,5 cm de altura, os quais foram moldados anteriormente, e em seguida, a forma foi preenchida com as misturas de compósitos.

Antes das moldagens, nas superfícies dos substratos de concreto, que ficariam em contato com as camadas de reparo, foram aplicadas ranhuras, para melhor aderência com as camadas de reparos. Os discos de concreto, com 30 cm de diâmetro e 7,5 cm de altura, foram lavados para remoção do pó, enxugados de forma a não levarem água para a forma e, em seguida, colocados nas formas cilíndricas, com 30 cm de diâmetro e 10 cm de altura, de forma a serem moldadas as camadas de reforço, com 2,5 cm de altura.

As misturas de compósitos frescas foram colocadas nas formas, nas superfícies dos concretos, e em seguida foi realizado o adensamento com ajuda de uma haste metálica.

Após 24h, os corpos de prova foram desmoldados (Figura 25) e colocados em cura úmida por 28 dias.



Figura 25 – Conjunto reparado (substrato de concreto + reforço de compósito) após desmoldagem.

2.5.2 Moldagem da matriz dos compósitos

Para investigar o efeito do uso de metacaulinita e cinza volante no processo de fratura das argamassas, foram produzidas oito misturas de argamassas (matrizes dos compósitos). As quantidades de materiais usadas nas misturas estão listadas na Tabela 8. Cabe ressaltar que as quantidades de materiais são as mesmas dos compósitos, somente as quantidades de superplastificante (SP) foram reduzidas, de forma a ajustar a trabalhabilidade da mistura.

Tabela 8 – Quantidade de materiais usados na moldagem da matriz dos compósitos (kg/m³).

Misturas	Quantidade de materiais em kg/m ³					
	C ¹	MK ²	CV ³	Areia	Água	SP ⁴
MC50	599,99	599,99	0,00	431,99	412,79	14,80
MC40CV10	592,56	474,05	118,51	426,64	407,68	13,23
MC30CV20	585,32	351,19	234,13	421,43	402,70	7,02
MC20CV30	578,25	231,30	346,95	416,34	397,83	1,86
MC10CV40	571,34	114,27	457,08	411,37	393,08	1,38
CV50	564,61	0,00	564,61	406,52	388,45	0,00
CV1	528,41	0,00	634,09	418,50	362,70	0,00
CV2	555,53	0,00	666,64	439,98	329,99	0,00

Foram utilizados corpos de prova cilíndricos para ensaios de compressão axial e massa específica e corpos de prova prismáticos para ensaios de tenacidade à fratura. O processo de produção, adensamento e cura das matrizes é igual ao dos compósitos, excluindo-se a colocação das fibras.

2.6 Ensaios experimentais no concreto

2.6.1 Propriedades no estado fresco

Foram realizados ensaios de consistência e massa específica para verificar as propriedades do concreto no estado fresco.

2.6.1.1 Consistência

O ensaio de consistência, também conhecido como ensaio de abatimento ou “*slump test*” avalia a trabalhabilidade e/ou fluidez no concreto no estado fresco a partir do assentamento do mesmo com base na NBR 16889 (2020), conforme mostrado na Figura 26.



Figura 26 – Ensaio de abatimento do concreto.

2.6.1.2 Massa específica

O ensaio de massa específica do concreto no estado fresco foi realizado com base na NBR 9833 (2009). Para determinação da massa específica, foi utilizada a Equação 1.

$$\rho_{ap} = \frac{M}{V} \times 1000 \quad (1)$$

Sendo,

ρ_{ap} a massa específica aparente do concreto (kg/m³);

M a massa fresca do concreto (kg);

V o volume do recipiente (dm³).

2.6.2 Propriedades físicas do concreto endurecido

2.6.2.1 Índice de vazios, absorção de água e massa específica

Os ensaios de índice de vazios, absorção de água e massa específica foram realizados seguindo-se a norma NBR 9778 (2009). Foram utilizadas três amostras por mistura com as dimensões de 10 x 20 cm (diâmetro x altura).

2.6.3 Propriedades mecânicas

Foram realizados ensaios de compressão axial e tração por compressão diametral para verificar as propriedades mecânicas do concreto aos 28 dias de idade.

2.6.3.1 Compressão axial

O ensaio de resistência à compressão axial do concreto foi realizado aos 28 dias de idade, como indica a Figura 27, em três corpos de prova, seguindo os procedimentos descritos na NBR 5739 (2018).

Aos 28 dias também foi determinado o módulo de elasticidade do concreto. Os ensaios foram realizados em três corpos de prova cilíndricos com 10 x 20 cm, e de acordo com a NBR 8522 (2017).



Figura 27 – Ensaio de resistência à compressão axial do concreto.

2.6.3.2 Tração por compressão diametral

O ensaio de tração por compressão diametral do concreto utilizou como base a NBR 7222 (2017). A resistência à tração por compressão do concreto foi obtida a partir da Equação 2.

$$F_{ct,sp} = \frac{2F}{\pi d l} \quad (2)$$

Sendo,

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

F a força máxima alcançada (N);
d o diâmetro do corpo de prova (mm);
l o comprimento do corpo de prova (mm).

2.7 Ensaios experimentais nos compósitos, matrizes e conjuntos reparados

2.7.1 Propriedades no estado fresco

Foram realizados ensaios de consistência e massa específica para verificar as propriedades dos compósitos e matrizes no estado fresco.

2.7.1.1 Consistência

O ensaio de consistência avaliou a trabalhabilidade e/ou fluidez do compósito e matriz no estado fresco, a partir do assentamento do mesmo. Com base na NBR 13276 (2016) foram realizados os procedimentos para a determinação do índice de consistência, de forma que o tronco de cone foi preenchido com três camadas de aproximadamente um terço da altura e compactadas com 15, 10 e 5 golpes, respectivamente, utilizando um soquete metálico. De imediato, a superfície foi rasada e a base limpa para a retirada do molde.

Logo após foi acionada a manivela da mesa para índice de consistência, de modo que a mesa subisse e caísse 30 vezes em 30 segundos de maneira uniforme. Imediatamente após a última queda da mesa foi necessário medir o espalhamento em três diâmetros diferentes, as três medidas foram registradas e, então, feita uma média entre as mesmas, assim como mostra a Figura 28.



Figura 28 – Ensaio de consistência do compósito e da matriz do compósito.

2.7.1.2 Massa específica

O ensaio de massa específica do compósito e matriz no estado fresco foi realizado com base na NBR 13278 (2009). O adensamento foi realizado manualmente, utilizando três camadas com alturas iguais, realizando 20 golpes em cada camada. Para concluir o adensamento, a superfície foi rasada, limpa e pesada, ver Figura 29. Para determinação da massa específica foi utilizada a Equação 3.

$$D = \frac{m_c - m_v}{v_r} \times 1000 \quad (3)$$

Sendo,

d a massa específica aparente da argamassa (kg/m^3);

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

m_v a massa do recipiente cilíndrico vazio (g);

v_r o volume do recipiente cilíndrico (cm^3).



Figura 29 – Ensaio de massa específica do compósito.

2.7.2 Propriedades físicas no estado endurecido

2.7.2.1 Índice de vazios, absorção de água e massa específica

Os ensaios de índice de vazios, absorção de água e massa específica foram realizados nos compósitos e matrizes. Os ensaios foram realizados seguindo-se o procedimento descrito na norma NBR 9778 (2009). Foram utilizadas três amostras por mistura com as dimensões de 5 x 10 cm (diâmetro x altura).

2.7.3 Propriedades mecânicas

Foram realizados ensaios de compressão axial nos compósitos e nas matrizes dos compósitos aos 28 dias de idade.

2.7.3.1 Compressão axial

Para o ensaio de compressão do compósito e matriz foram utilizados três corpos de prova cilíndricos de cada mistura com 5 cm de diâmetro e 10 cm de altura. Antes dos ensaios os corpos de prova cilíndricos foram nivelados utilizando-se a técnica de capeamento, tendo em vista que as superfícies irregulares e não planas dos topos dos corpos de prova podem impactar negativamente e resultar na transmissão não uniforme da tensão de compressão, causando ruptura prematura das amostras.

Os ensaios de compressão foram realizados aos 28 dias, em uma máquina servo-controlada INSTRON de 100 kN a uma velocidade de deformação axial de 0,3 mm/min, como mostra a Figura 30. Os deslocamentos axiais foram medidos por dois extensômetros, com um curso de 5 mm, posicionados na região central da amostra.

A resistência à compressão foi determinada a partir da Equação 4.

$$\sigma = \frac{P}{A} \quad (4)$$

Sendo,

σ a tensão de tração;

P a carga aplicada;

A a área da seção transversal do corpo de prova.

A determinação do Módulo de Elasticidade nos compósitos e matrizes ocorreu através dos ensaios de resistência à compressão. Seu cálculo foi efetuado considerando a inclinação da reta tangente ao gráfico de tensão vs. deformação até atingir 30% da tensão máxima.



Figura 30 – Ensaio de compressão axial nos compósitos.

2.7.3.2 Tenacidade à fratura

Os corpos de prova prismáticas de argamassa (matriz do compósito) com dimensões de $40 \times 80 \times 400$ mm foram preparados para determinar a tenacidade à fratura das argamassas. Quatro corpos de prova para cada mistura foram pré-entalhadas no meio do vão antes do teste de flexão em três pontos, seguindo a norma ASTM E399 (2012). A razão relativa de profundidade do entalhe com relação à altura da viga foi mantida em 0,3. Conforme mostrado na Figura 31, a amostra foi apoiada sobre um vão de carga ($L = 320$ mm), e os testes de flexão foram realizados aos 28 dias sob uma taxa de controle de deslocamento de 0,6 mm/min. Os testes de flexão foram conduzidos em uma máquina INSTRON controlada por servo motor com capacidade de 100 kN. O método de mecânica de fratura elástica linear (LI E MISHRA, 1995) foi utilizado para determinar a tenacidade à fratura devido ao tamanho reduzido da zona de processo de fratura na matriz sem agregado graúdo. A tenacidade à fratura K_m pode ser calculada pelas Eqs. 5 e 6 (XU E REINHARDT, 1999).



Figura 31 – Configuração de tenacidade à fratura da matriz dos compósitos.

$$K_m = \frac{1.5 \left(P + \frac{mg}{2} \right) S \sqrt{a}}{BW^2} f(\alpha) \quad (5)$$

$$f(\alpha) = \frac{1.99 - \alpha (1 - \alpha) (2.15 - 3.93\alpha + 2.7\alpha^2)}{(1 + 2\alpha)(1 - \alpha)^{3/2}} \quad (6)$$

onde P é a carga máxima; S é o vão da viga; B é a largura da viga; W é a altura da amostra; $\alpha = a/W$ é a razão relativa de profundidade da entalhe; a é a profundidade da entalhe; m é a massa da amostra; g é a aceleração da gravidade.

De acordo com Li (1993), a energia de fratura da argamassa, J_{tip} , é calculada de acordo com a Eq. 7, onde E é o módulo de elasticidade da argamassa.

$$J_{tip} = \frac{K_m^2}{E} \quad (7)$$

2.7.3.3 Flexão

O desempenho dos compósitos na flexão foi avaliado através de ensaios de flexão em quatro pontos. Os corpos de prova foram constituídos de, no mínimo, 3

placas retangulares com as dimensões iguais a 12,5 x 60 x 400 mm com vão entre apoios igual a 255 mm.

Os ensaios foram realizados na prensa mecânica INSTRON com 100kN de capacidade. A velocidade de ensaio foi igual a 0,5 mm/min. Os deslocamentos foram medidos por um deflectômetro posicionado no meio do vão (ver Figura 32). Curvas carga x deslocamento dos compósitos foram obtidas aos 28 dias de idade.

Foram obtidos valores de tensão (σ_{cr}) e deslocamento (δ_{cr}) de primeira fissura e valores de tensão (σ_u) e deslocamento (δ_u) máximos pós-fissuração dos compósitos. A tensão de primeira fissura e a máxima tensão pós-fissuração foram calculadas utilizando-se a Equação 8.

$$\sigma = \frac{6M}{bd^2} \quad (8)$$

Sendo,

σ a tensão na flexão;

M o Momento fletor no meio do vão;

b a dimensão da base da amostra;

d a altura da amostra.



Figura 32 – Configuração de flexão dos compósitos.

2.7.3.4 Compressão diametral

O ensaio de compressão diametral foi realizado na matriz do compósito. Nesse ensaio, um corpo de prova cilíndrico de argamassa foi colocado entre placas planas da máquina servo-controlada INSTRON de 100 kN a uma velocidade de deformação axial de 0,3 mm/min, e uma carga foi aplicada perpendicularmente ao diâmetro do cilindro, causando a compressão diametral, como mostra a Figura 33.

A resistência à compressão diametral foi então calculada com base na carga máxima suportada pelo corpo de prova (Equação 2).



Figura 33 – Configuração de compressão diametral da matriz dos compósitos.

2.7.3.5 Tração direta

Os ensaios de tração foram realizados nos compósitos para a obtenção dos valores de tensão e deformação de primeira fissura e valores máximos pós-fissuração. Este tipo de ensaio tem alto grau de dificuldade, uma vez que qualquer

desalinhamento da amostra com o eixo de aplicação de carga pode gerar tensões de flexão ou de torção, ocasionando a ruptura prematura da amostra.

Para a realização dos ensaios de tração direta foi utilizado um *setup*, proposto pela norma Japonesa (JSCE – *Japan Society of Civil Engineers*) de 2008. Nos ensaios foram utilizadas, no mínimo, 3 amostras com as dimensões iguais a 30 x 30 x 330 mm (largura na parte central x espessura x comprimento total da amostra), conforme a Figura 34.

Os ensaios foram realizados após 28 dias de cura em uma prensa mecânica INSTRON, com capacidade de carga igual a 100 kN. A velocidade de ensaio foi igual a 0,1 mm/min e os deslocamentos medidos por dois extensômetros posicionados nas laterais dos corpos de prova com comprimento de medida igual a 80 mm (Figura 35).

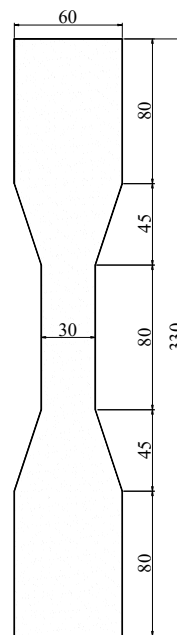


Figura 34 - Amostra utilizada no ensaio de tração direta (todas as dimensões em milímetros).



Figura 35 – Configuração de tração direta dos compósitos.

2.8 Ensaios de dureza superficial

A norma NBR 7584 (2012) foi adaptada para realização do ensaio de dureza superficial nos corpos de prova de compósitos. Nos ensaios foram utilizados 3 corpos de prova cúbicos com as dimensões de 100 x 100 x 100 mm por mistura.

O ensaio de esclerometria é uma técnica de ensaio não destrutivo utilizado para determinar a dureza superficial de materiais não metálicos, consiste na utilização de um sistema (massa–mola), que possui uma determinada quantidade de energia, para “golpear” a superfície do material a ser testado. No ensaio em questão foi utilizado o Esclerômetro Digital Silver Schmidt PC modelo N (Figura 36).



Figura 36 - Esclerômetro Digital utilizado no ensaio para determinação do índice esclerométrico.

Foram utilizadas as 4 superfícies dos corpos de prova cúbicos (Figura 37), em cada superfície foram separadas 4 áreas, e golpeado o centro de cada uma dessas áreas, totalizando 16 golpes em cada corpo de prova.

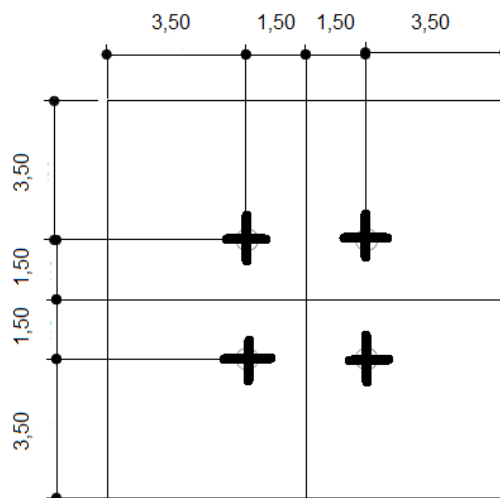


Figura 37 – Demonstração das marcações feitas na face do corpo de prova cúbico (em cm) utilizado no ensaio de dureza superficial.

O esclerômetro é composto por uma haste que causa impactos sobre a superfície do material a ser testado, de modo que a energia de impacto é absorvida por sua superfície. Esta medida é então convertida em uma leitura de esclerometria, que é correlacionada com a dureza superficial do material. Com o golpe, a mola se comprime e, logo em seguida, se distende, proporcionalmente à resistência oferecida pela superfície de impacto. O ricochete depende do valor da energia cinética antes do impacto e de quanto dessa energia é absorvida durante o mesmo. A energia absorvida está relacionada à resistência e à rigidez do material, enquanto a outra parte da energia é absorvida na fricção mecânica do equipamento.

No ensaio, os corpos de prova foram colocados na máquina utilizada para ensaio de compressão e foi aplicada uma força mínima, suficiente para fixação do corpo de prova, de modo que não houvesse deslocamento dos mesmos quando sujeitos ao golpe do esclerômetro (Figura 38).

Segundo a norma, o esclerômetro deve ser aferido antes de ser utilizado pela primeira vez, ou a cada 300 impactos realizados. Essa manutenção é necessária para a vida útil do equipamento.

Para a aferição, foi utilizado um bloco de metal com uma dureza já conhecida, foi verificada se a superfície estava limpa e livre de detritos. O esclerômetro foi colocado na vertical sobre o bloco de referência, foi então realizada medições em várias áreas do bloco e calculada a média desses valores, esse procedimento é importante para rastrear qualquer tipo de desvio nas leituras do aparelho.



Figura 38 – Corpo de prova cúbico preparado para receber os golpes do esclerômetro.

Para cálculo dos resultados, é necessário identificar o coeficiente de correção do índice esclerométrico, dado na Equação 9. Já para o cálculo do índice esclerométrico médio efetivo é utilizada a Equação 10.

$$k = \frac{\eta \cdot I_{Enom}}{\sum_{i=1}^{\eta} IE_i} \quad (9)$$

Sendo,

k o coeficiente de correção do índice esclerométrico;

η o número de impactos da bigorna de aço;

I_{Enom} o índice esclerométrico nominal do aparelho na bigorna de aço, fornecido pelo fabricante;

IE_i o índice esclerométrico obtido em cada impacto do esclerômetro na bigorna de aço.

$$IE_{\alpha} = k \cdot IE \quad (10)$$

Sendo,

IEa o índice esclerométrico médio efetivo;

k o coeficiente de correção do índice esclerométrico;

IE o índice esclerométrico médio.

2.9 Ensaios de erosão

Os ensaios de erosão foram realizados em corpos de prova com somente compósitos e no concreto reparado com uma camada de compósito. Os corpos de prova de compósitos tinham as dimensões de 30 cm de diâmetro e 10 cm de altura, e os corpos de prova compostos, eram formados por uma camada de substrato de concreto com 30 cm de diâmetro e 7,5 cm de altura, reparado com uma camada de compósito com 30 cm de diâmetro e 2,5 cm de altura.

As misturas CV1 e CV2 foram utilizadas nos corpos de prova com somente compósito. E as misturas MC50, MC40CV10, MC30CV20, MC20CV30, MC10CV40 e CV50 foram utilizadas como uma fina camada de reparo no substrato de concreto.

Os testes foram realizados aos 28 dias, e seguindo-se os procedimentos descritos na norma ASTM C 1138 (2019), método subaquático. Essa norma abrange um procedimento para encontrar a resistência à abrasão relativa do concreto sob a água devido à ação das partículas aquosas (areia, cascalho e outros detritos). No ensaio foram utilizadas esferas sólidas suspensas que produzem abrasão no material. O corpo de prova foi colocado no recipiente (Figura 39a) com a superfície a ser testada voltada para cima, enquanto uma pá agitadora imersa na água inicia as atividades de rotação, com finalidade de fazer as esferas se chocarem contra a superfície do material (Figura 39b). Ao todo foram utilizadas 69 esferas, sendo 10 esferas com 2 cm de diâmetro, 35 esferas com 1,5 cm de diâmetro e 24 esferas com 1 cm de diâmetro.

Os ensaios foram realizados em 3 corpos de prova por mistura, totalizando 24 corpos de prova. Cada corpo de prova foi colocado no recipiente em questão onde permaneceu por 72 horas, no entanto a cada 12 horas o corpo de prova era retirado para que fossem feitas as leituras de sua massa submersa e de sua massa na condição saturada superfície seca, para que dessa maneira fosse analisada a perda gradativa de volume em consequência do processo erosivo.

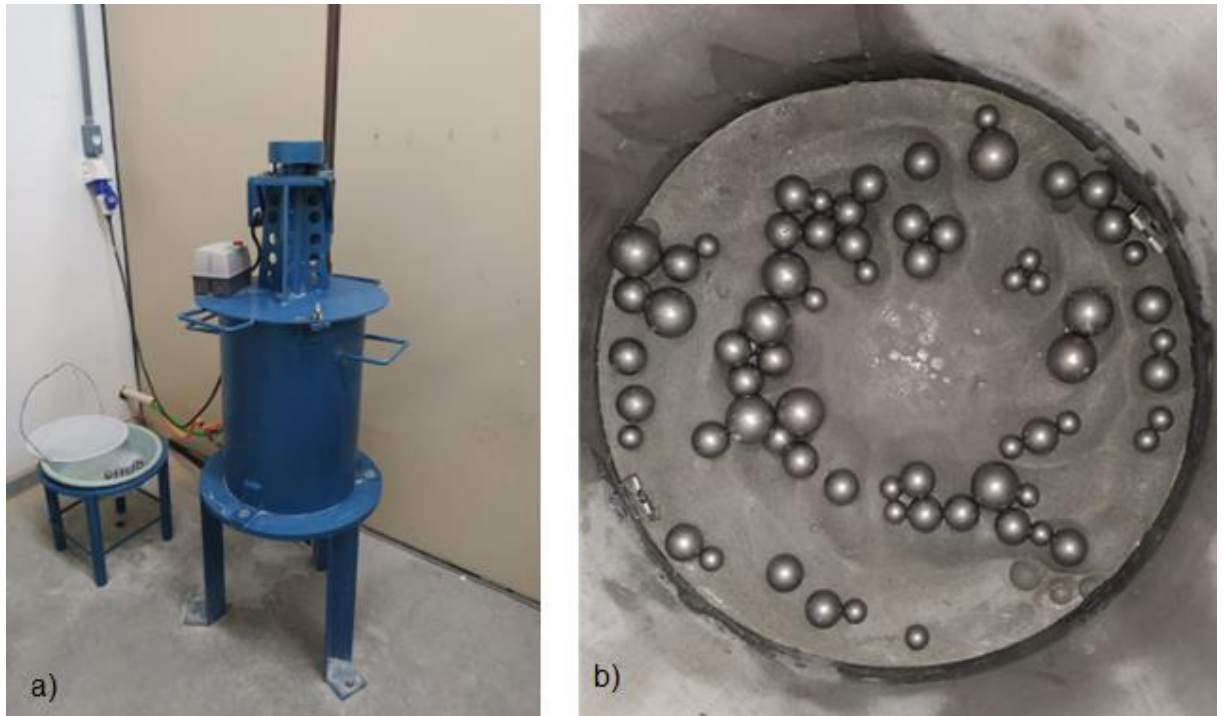


Figura 39 – a) Equipamento utilizado para o ensaio de abrasão em água e b) corpo de prova no interior do equipamento e em sua superfície as esferas que provocam erosão.

O volume do corpo de prova em qualquer momento é calculado de acordo com a Equação 11:

$$V_t = \frac{W_{ar} - W_{água}}{G_{água}} \quad (11)$$

Sendo,

V_t o volume do corpo de prova no tempo desejado, m^3

W_{ar} a massa do corpo de prova no ar no tempo desejado, kg

$W_{água}$ a massa aparente do corpo de prova na água no tempo desejado, kg

$G_{água}$ o peso unitário da água, kg/m^3 .

Já o volume perdido a qualquer momento é calculado pela Equação 12:

$$V_{Lt} = V_i - V_t \quad (12)$$

Sendo,

VLt o volume de material perdido por abrasão, m³

Vi o volume do corpo de prova antes do teste, m³

Vt o volume do corpo de prova ao final do ensaio, m³.

Neste ensaio também foi determinado a profundidade média de desgaste em cada corpo de prova, que é calculada pela Equação 13:

$$ADAt = \frac{VLt}{A} \quad (13)$$

Sendo,

ADAt a profundidade média de abrasão ao final do ensaio, m

A a área do topo do corpo de prova, m².

3 RESULTADOS

3.1 Propriedades das matrizes dos compósitos

3.1.1 Propriedades no estado fresco

A Tabela 9 apresenta a consistência e a massa específica das misturas frescas. Todas as argamassas alcançaram uma consistência plástica semelhante (entre 229 e 251 mm). Além disso, é possível observar que os valores da massa específica aumentam com o aumento do teor de metacaulinita, consequência da menor massa específica da cinza volante quando comparada à metacaulinita. Em geral, materiais com partículas menores tendem a ter uma massa específica maior. Isso ocorre porque, à medida que o tamanho das partículas diminui, a quantidade de espaços vazios entre as partículas diminui, resultando em uma maior densidade.

Tabela 9 – Consistência e massa específica das argamassas frescas.

Misturas	Consistência (cm)	Massa específica (g/cm ³)
MC50	23,60	2,00
MC40CV10	24,00	1,96
MC30CV20	25,10	1,93
MC20CV30	22,90	1,90
MC10CV40	24,47	1,88
CV50	22,90	1,88
CV1	24,90	1,96
CV2	21,97	1,93

3.1.2 Propriedades físicas

A Tabela 10 mostra que a porosidade e a absorção de água da mistura MC40CV10 foram ligeiramente reduzidas em 3% e 4%, respectivamente, enquanto a densidade aumentou em 2%, em comparação com a mistura MC50, sendo esses valores muito pequenos de acordo com análises estatísticas, logo, é considerado que as misturas em questão são similares. No entanto, o aumento do nível de substituição de MK por CV levou a um aumento adicional da porosidade e absorção de água, além de uma diminuição na densidade, como mostra a Figura 40. A mistura CV50, contendo apenas cimento e CV, também apresentou valores de porosidade e absorção de água mais elevados, além de uma densidade mais baixa, do que a mistura MC50. A mistura MC50 apresenta menor porosidade que a mistura CV50, isso pode ser consequência da menor finura da MK quando comparada com a finura da CV. Segundo Sabir et al. (2001) a metacaulinita, por ser mais fina, possui um alto teor de sílica reativa, o que promove a formação de produtos de hidratação adicionais, resultando em uma matriz cimentícia mais densa e resistente. Além disso, Santana e Magalhães (2022) citam que a presença de metacaulinita ajuda a reduzir a porosidade e aumentar a durabilidade dos materiais. É essencial notar que em certas Tabelas, como na Tabela 10, ao lado dos dados quantitativos, há valores entre parênteses que indicam o desvio padrão correspondente às quantidades de amostras requeridas para cada ensaio.

Tabela 10 – Valores da porosidade, absorção de água e massa específica das misturas de argamassa.

Misturas	Porosidade (%)	Absorção de água (%)	Massa específica (g/cm ³)
MC50	28,85 (0,60)	16,49 (0,42)	1,75 (0,01)
MC40CV10	28,04 (0,88)	15,79 (0,32)	1,78 (0,04)
MC30CV20	29,27 (0,90)	16,97 (0,71)	1,72 (0,02)
MC20CV30	29,89 (1,24)	17,65 (2,15)	1,60 (0,03)
MC10CV40	28,60 (0,03)	17,97 (0,41)	1,58 (0,01)
CV50	30,32 (0,38)	19,25 (0,33)	1,58 (0,02)
CV1	25,95 (1,37)	15,94 (0,94)	1,63 (0,01)
CV2	23,15 (0,70)	14,26 (0,43)	1,62 (0,00)

A redução da densidade da argamassa CV, em relação a MK, pode ser devida à menor densidade da CV em comparação com a densidade da MK, além de uma porosidade mais elevada na mistura CV50. A mistura CV2 obteve os menores valores de porosidade e absorção de água, isso por conta da diminuição da relação a/mc. Já a massa específica foi semelhante à da mistura CV1.

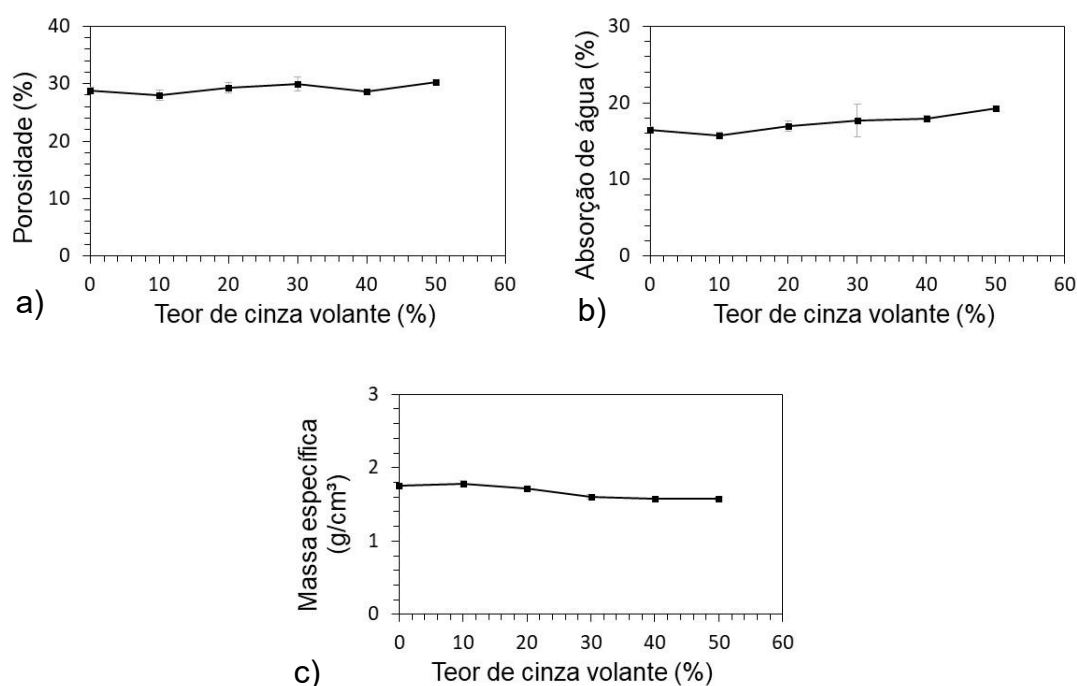


Figura 40 – Relação do teor de cinza volante com as propriedades físicas de (a) porosidade, (b) absorção de água e (c) massa específica da matriz no estado endurecido.

3.1.3 Compressão axial

A Tabela 11 apresenta os valores médios de resistência à compressão (f_c) e Módulo de Elasticidade (E) das diferentes misturas de argamassas. O valor do desvio padrão (DP) também é indicado entre parênteses para mostrar a dispersão dos resultados.

Tabela 11 – Resistência à compressão e Módulo de Elasticidade das matrizes.

Misturas	f_c (MPa)	E (GPa)
MC50	41,46 (2,29)	17,09 (0,16)
MC40CV10	44,01 (0,88)	18,07 (0,97)
MC30CV20	36,40 (1,61)	17,42 (1,35)
MC20CV30	32,00 (1,02)	16,96 (0,57)
MC10CV40	30,26 (2,56)	16,77 (0,54)
CV50	31,17 (1,23)	17,07 (1,02)
CV1	25,70 (1,34)	16,64 (1,03)
CV2	32,58 (2,37)	17,39 (0,68)

Para melhor compreensão dos resultados, vamos analisar a Figura 41a, sendo possível observar que a mistura MC40CV10 apresenta os valores mais elevados de resistência à compressão (aproximadamente 44 MPa), o que indica que, neste estudo, a combinação de 10% de CV e 40% de MK é o teor ótimo para a resistência à compressão. Além de ser explícito que misturas com maiores quantidades de metacaulinita apresentam maiores resistências à compressão, resultado do maior índice de atividade pozolânica da metacaulinita. Além disso, o aumento adicional na quantidade de CV (20%, 30%, 40% e 50%) e a consequente redução na quantidade de MK (30%, 20%, 10% e 0%) não demonstraram melhorias na resistência à compressão das argamassas.

Em relação ao módulo de elasticidade, os resultados na Figura 41b indicam que ele não foi significativamente influenciado pelo teor de MK (metacaulinita) e CV (cinza volante) nas misturas.

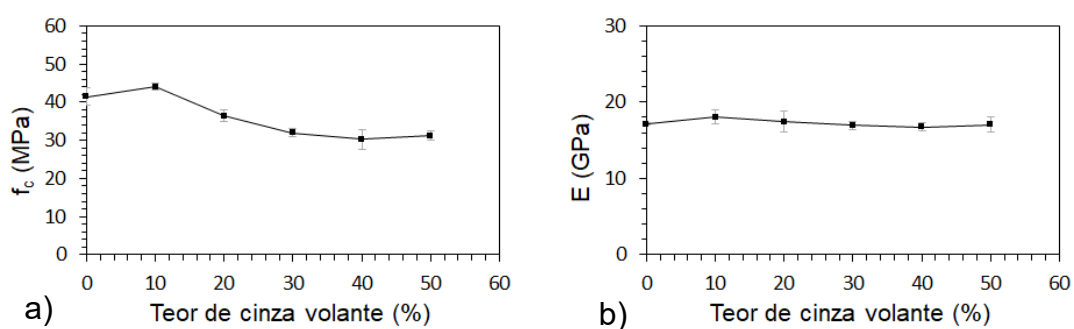


Figura 41 - Relação do teor de cinza volante com as propriedades de (a) compressão axial e (b) módulo de elasticidade da matriz.

É importante citar o modo de ruptura dos corpos de prova de argamassa, quando expostos a carga compressiva, como mostra a Figura 42. Além da destruição parcial dos mesmos, é possível perceber que o ensaio é bem mais rápido se comparado com corpos de prova de compósitos, consequência da não utilização de fibras em sua confecção.



Figura 42 – Modo de ruptura da matriz quando exposta a força de compressão.

3.1.4 Compressão diametral

A compressão diametral é um tipo de teste utilizado para avaliar a resistência de materiais à tração indireta. Na Figura 43 e Tabela 12 é possível observar que, estatisticamente, as misturas MC50, MC40CV10 e MC30CV20 apresentam os maiores valores de resistência à compressão diametral. Além disso, os resultados seguem um determinado padrão, à medida que diminui o teor de metacaulinita e aumenta o teor de cinza volante, essa resistência diminui.

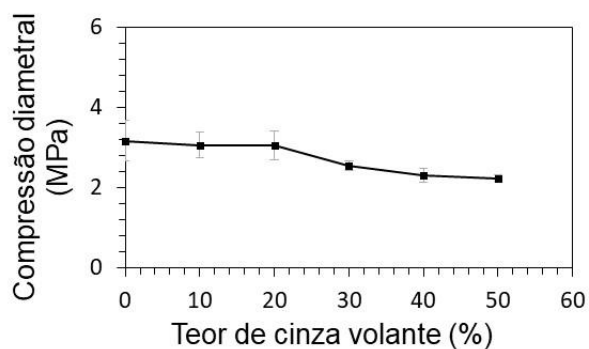


Figura 43 - Relação do teor de cinza volante com compressão diametral da matriz.

Tabela 12 – Valores da resistência a compressão diametral das matrizes.

Misturas	Compressão diametral (MPa)
MC50	3,17 (0,50)
MC40CV10	3,06 (0,32)
MC30CV20	3,05 (0,36)
MC20CV30	2,55 (0,13)
MC10CV40	2,31 (0,18)
CV50	2,24 (0,07)
CV1	2,97 (0,09)
CV2	2,83 (0,27)

Portanto, pode-se citar que a utilização de CV, que apresentou como consequência compósitos mais porosos e menos densos em relação àqueles com maior teor de MK, apresenta menor efeito na compressão diametral. A Figura 44 mostra o modo de ruptura do corpo de prova após o ensaio.

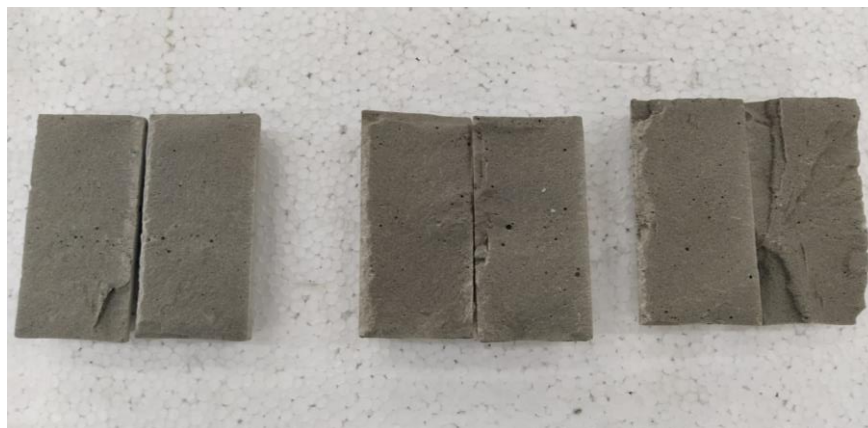


Figura 44 – Corpos de prova após exposição à carga de compressão diametral.

3.1.5 Tenacidade e energia de fratura das argamassas

Era esperado que os maiores valores de tenacidade à fratura e energia de fratura também fossem encontrados na mistura MC40CV10, pois a mesma apresenta maiores valores de resistência mecânica. Ao comparar as misturas que têm ambas as adições minerais, é possível observar que o aumento no teor de metacaulinita e diminuição no teor de cinza volante aumenta a resistência à fratura das argamassas, como mostra a Tabela 13 e a Figura 45.

Tabela 13 – Tenacidade à fratura e energia de fratura das matrizes.

Misturas	K_m (MPa.m ^{1/2})	J_{tip} (J/m ²)
MC50	0,43 (0,02)	10,74 (1,13)
MC40CV10	0,43 (0,04)	10,34 (2,15)
MC30CV20	0,41 (0,03)	9,76 (1,30)
MC20CV30	0,39 (0,01)	8,71 (0,52)
MC10CV40	0,37 (0,01)	8,54 (0,28)
CV50	0,37 (0,00)	7,83 (0,13)
CV1	0,35 (0,09)	7,72 (3,78)
CV2	0,38 (0,09)	10,51 (4,51)

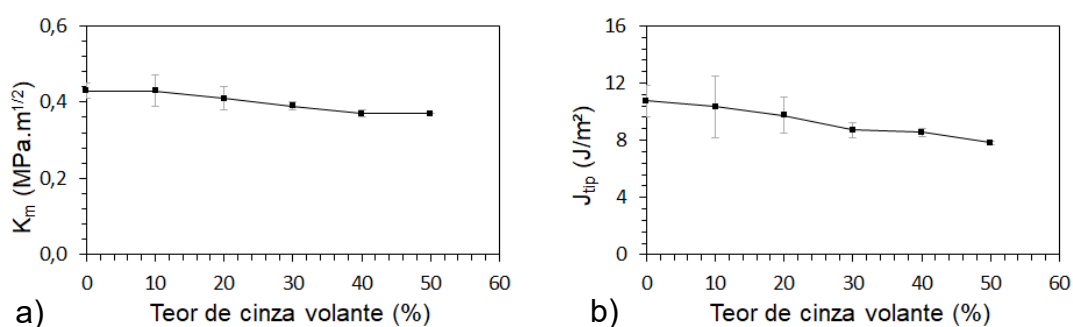


Figura 45 – Relação do teor de cinza volante com as propriedades de (a) tenacidade à fratura e (b) energia de fratura da matriz.

A mistura MC50 apresentou um valor de tenacidade à fratura de $0,43 \text{ MPa.m}^{1/2}$ e uma energia de fratura de $10,74 \text{ J/m}^2$, destacando sua maior capacidade de absorver energia antes de fraturar. A mistura MC10CV40, com 10% de metacaulinita e 40% de cinza volante, obteve valores de $0,37 \text{ MPa.m}^{1/2}$ e $8,54 \text{ J/m}^2$, enquanto a mistura CV50, com 0% de metacaulinita, mostrou valores de $0,37 \text{ MPa.m}^{1/2}$ e $7,83 \text{ J/m}^2$. Isso demonstra que o baixo teor, ou ausência, de metacaulinita, reduziu a tenacidade e energia de fratura das argamassas.

Ter uma energia de fratura mais alta significa que um material é capaz de absorver uma quantidade maior de energia antes de falhar quando sujeito a uma trinca. A energia de fratura é uma medida da quantidade total de energia necessária para propagar uma fissura em um material (SANTOS, 2005). Isso indica maior resistência e tenacidade do material, permitindo que ele suporte cargas e deformações mais significativas, ainda que haja ruptura frágil. Em termos práticos, uma energia de fratura mais alta frequentemente está associada a materiais mais robustos e resilientes que podem suportar cargas ou impactos intensos, assim essa argamassa seria mais durável e capaz de suportar melhor as tensões que podem levar à formação de fissuras. Portanto, uma energia de fratura mais alta é geralmente considerada uma característica desejável em materiais de construção, pois indica uma maior capacidade de resistir a danos causados por fissuras e trincas.

Nesta pesquisa, a tenacidade à fratura pode ser correlacionada com a resistências à compressão (f_c), como mostrado na Figura 46. Para estimar quantitativamente a influência de f_c na tenacidade à fratura, uma equação que correlaciona f_c com K_m foi derivada com base nos resultados experimentais. A

equação de melhor ajuste, com coeficiente de correlação elevado (valores de R^2 igual a 0,96), é uma função exponencial de f_c .

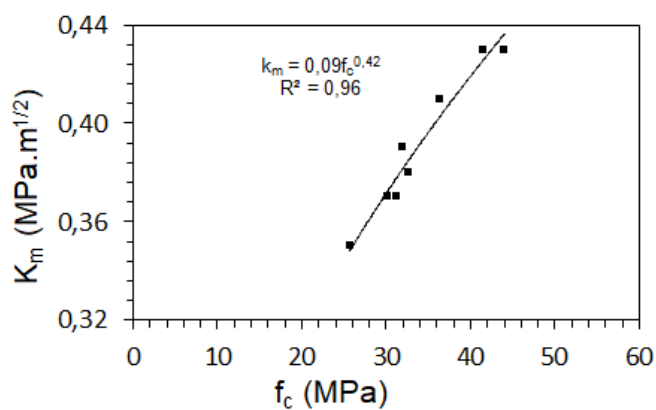


Figura 46 - Relação entre resistência à compressão (f_c) e tenacidade à fratura (K_m) das argamassas.

A Figura 47 mostra um exemplo da ruptura de um corpo de prova no ensaio de tenacidade à fratura.



Figura 47 – Corpo de prova após a ruptura no ensaio de tenacidade.

3.2 Propriedades dos compósitos

3.2.1 Propriedades no estado fresco

A Tabela 14 apresenta a consistência e a massa específica dos compósitos frescos. Foram tomadas medidas necessárias para minimizar variações na consistência entre as diferentes misturas dos compósitos, assim, todas as misturas alcançaram uma consistência plástica semelhante (22,93 – 27,83 mm).

Tabela 14 – Consistência e massa específica dos compósitos frescos.

Misturas	Consistência (cm)	Massa específica (g/cm ³)
MC50	22,93	1,99
MC40CV10	23,73	1,94
MC30CV20	26,03	1,98
MC20CV30	27,30	1,89
MC10CV40	27,83	1,89
CV50	27,40	1,86
CV1	25,77	1,84
CV2	23,57	1,90

É possível observar que, em geral, os valores da massa específica decrescem à medida que o teor de metacaulinita diminui. A redução da massa específica dos compósitos com a diminuição do teor de metacaulinita e aumento do teor de cinza volante é consequência da menor leveza da cinza volante quando comparada à metacaulinita.

Discutindo-se as misturas CV1 e CV2, percebe-se um aumento na massa específica da mistura CV2, uma vez que a diminuição de água pode acarretar na diminuição da porosidade e, desse modo, o aumento da massa específica.

3.2.2 Propriedades físicas no estado endurecido

A metacaulinita e a cinza volante reagem quimicamente com o hidróxido de cálcio gerado na hidratação do cimento. A combinação de ambas pode aumentar a eficácia na formação de produtos de hidratação adicionais que preenchem os espaços vazios e reduzem a porosidade.

Observando a Tabela 15 pode-se observar que, em geral as misturas com blendas de cinza volante com metacaulinita apresentaram menores valores de porosidade que a mistura com somente cinza volante ou com somente metacaulinita. A mistura CV2 apresenta menor porosidade em relação à mistura CV1, uma vez que o fator água/material cimentício é menor em comparação às outras misturas.

Os valores de absorção de água das misturas são diretamente proporcionais aos valores da porosidade.

Tabela 15 – Valores da porosidade, absorção de água e massa específica;

Misturas	Porosidade (%)	Absorção de água (%)	Massa específica (g/cm ³)
MC50	25,72 (0,11)	14,59 (0,03)	1,77 (0,01)
MC40CV10	23,64 (0,65)	13,09 (0,44)	1,81 (0,01)
MC30CV20	23,40 (2,44)	13,23 (1,62)	1,76 (0,03)
MC20CV30	21,33 (0,39)	12,57 (0,27)	1,70 (0,01)
MC10CV40	25,98 (0,62)	15,72 (0,50)	1,65 (0,01)
CV50	26,32 (1,21)	16,25 (0,89)	1,62 (0,02)
CV1	26,33 (1,68)	16,02 (1,33)	1,65 (0,03)
CV2	18,86 (0,79)	10,58 (0,30)	1,78 (0,03)

Em relação à massa específica dos compósitos no estado endurecido observa-se que quando utilizado teores de metacaulinita (50%, 40% e 30%) a massa específica manteve valores mais altos, porém a partir da mistura MC20CV30, é possível ver um decréscimo nos valores da massa específica, à medida que decaem os teores de metacaulinita e aumentam os teores de cinza volante, como mostra a Figura 48.

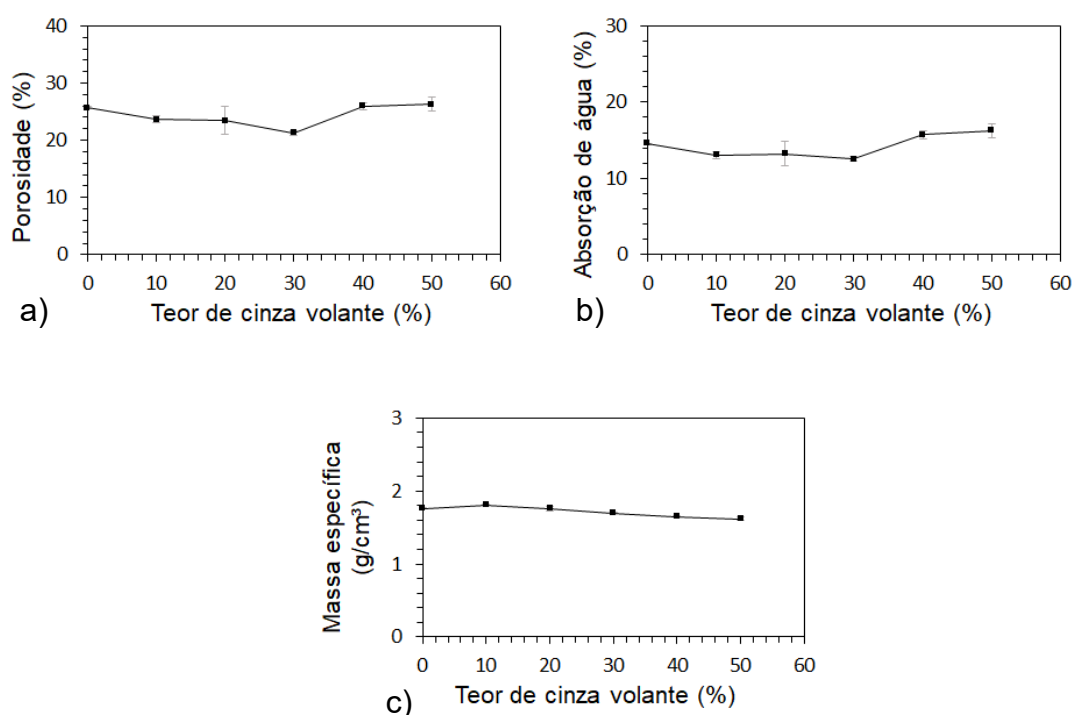


Figura 48 - Relação do teor de cinza volante com as propriedades físicas de (a) porosidade, (b) absorção de água e (c) massa específica dos compósitos no estado endurecido.

Assim como no estado fresco, a redução da massa específica dos compósitos com a diminuição do teor de metacaulinita e aumento do teor de cinza volante pode ser consequência do aumento da porosidade e/ou da maior leveza da cinza volante quando comparada à metacaulinita.

3.2.3 Propriedades mecânicas

3.2.3.1 Compressão axial e módulo de elasticidade

As Figuras 49, 50, 51 e 52 mostram as curvas tensão vs. deformação, e a Tabela 16 mostra os valores médios de resistência à compressão, módulo de elasticidade e deformação na tensão máxima dos compósitos.

Discutindo os compósitos, pode-se observar que a mistura MC40CV10 apresenta os valores mais elevados de resistência à compressão (45,27 MPa), ficando explícito que neste estudo, a combinação de 10% de CV e 40% de MK é o teor ótimo para a resistência à compressão. No entanto, o aumento adicional na quantidade de CV (20%, 30%, 40% e 50%) e a consequente redução na quantidade de MK (30%, 20%, 10% e 0%) não demonstraram melhorias na resistência à compressão dos compósitos. Em relação às misturas CV1 e CV2 ocorreu o que era esperado, com diminuição da relação a/mc, houve aumento da resistência à compressão.

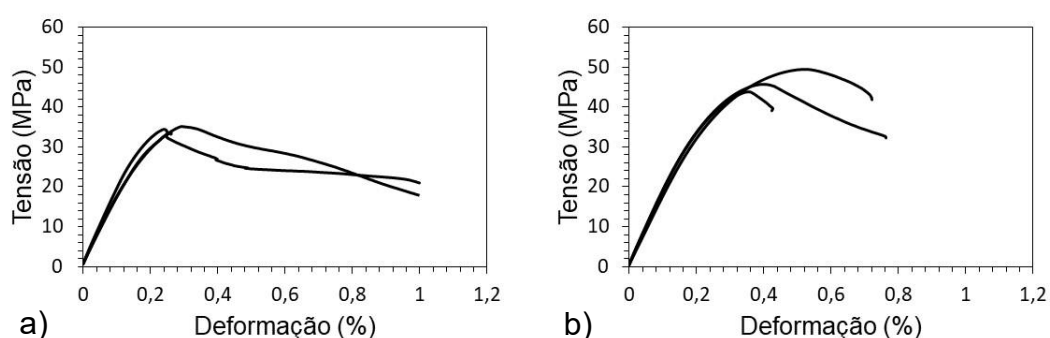


Figura 49 – Curvas tensão vs. deformação das misturas (a) MC50 e (b) MC40CV10 sob carga de compressão axial.

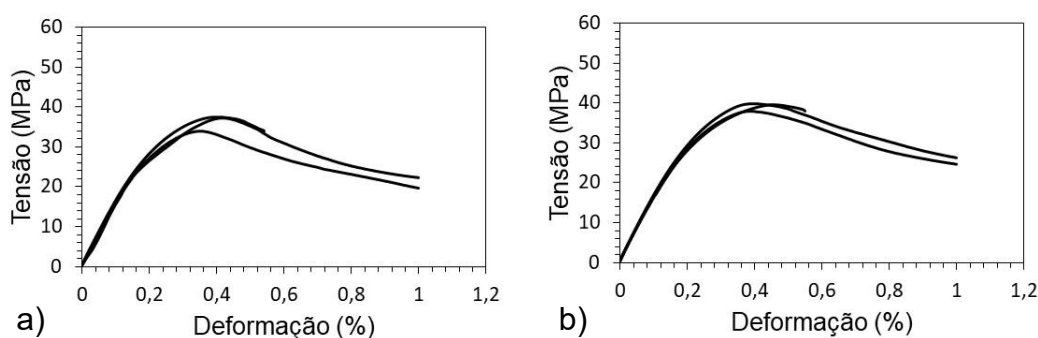


Figura 50 - Curvas tensão vs. deformação das misturas (a) MC30CV20 e (b) MC20CV30 sob carga de compressão axial.

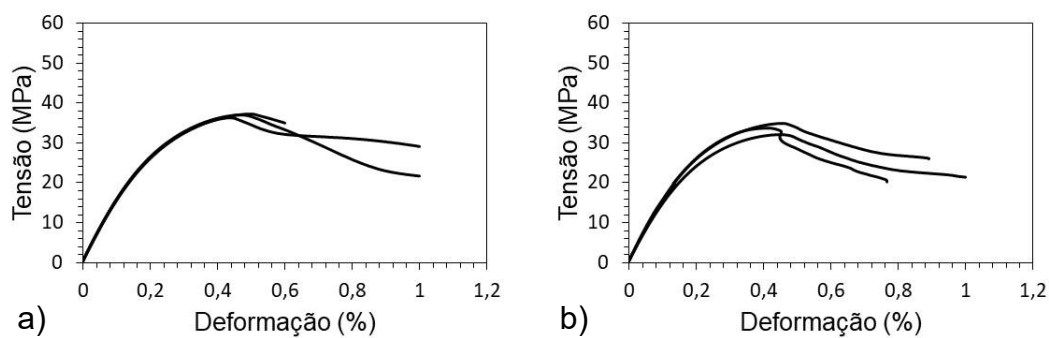


Figura 51 - Curvas tensão vs. deformação das misturas (a) MC10CV40 e (b) CV50 sob carga de compressão axial.

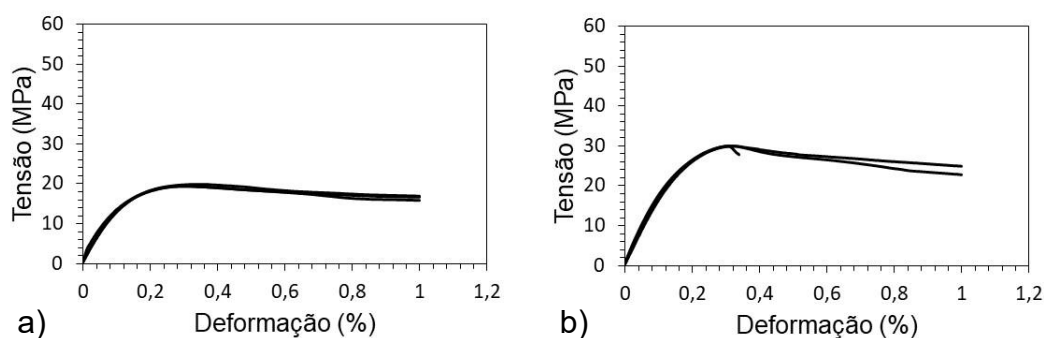


Figura 52 - Curvas tensão vs. deformação das misturas (a) CV1 e (b) CV2 sob carga de compressão axial.

Tabela 16 – Resistência à compressão, módulo de elasticidade e deformação na tensão máxima dos compósitos.

Misturas	f_c (MPa)	E (GPa)	Deformação (%)
MC50	37,95 (0,00)	18,12 (0,90)	0,26 (0,02)
MC40CV10	45,27 (1,11)	18,40 (0,79)	0,37 (0,11)
MC30CV20	38,27 (1,29)	16,82 (0,34)	0,41 (0,01)
MC20CV30	39,11 (0,79)	17,25 (0,36)	0,40 (0,04)
MC10CV40	36,81 (0,40)	16,38 (0,20)	0,38 (0,10)
CV50	33,45 (0,31)	16,47 (0,24)	0,42 (0,01)
CV1	20,65 (0,82)	14,37 (0,43)	0,32 (0,02)
CV2	29,98 (0,05)	17,97 (0,09)	0,31 (0,01)

A matriz da mistura com 50% de metacaulinita (MC50) apresentou altos valores de energia à fratura, logo era esperado que apresentasse também bons valores de resistência à compressão, sendo o maior valor quando comparado à mistura com 50% de cinza volante (CV50), como mostra a Figura 53a. Esse comportamento pode ser explicado pelo refinamento da matriz provocado pela adição de metacaulinita, tornando-a, assim, mais densa, além de ser mais reativa que a cinza volante, como demonstram os valores dos índices de atividade pozolânica.

Assim como na resistência à compressão, a mistura MC40CV10 também apresenta o maior valor de módulo de elasticidade e os menores valores são referentes às misturas que apresentam menor teor de MK e maior teor de CV, como indica a Figura 53b. Em relação às misturas CV1 e CV2, o módulo de elasticidade aumentou com a diminuição da relação a/mc. A Figura 54 apresenta os corpos de prova após ruptura.

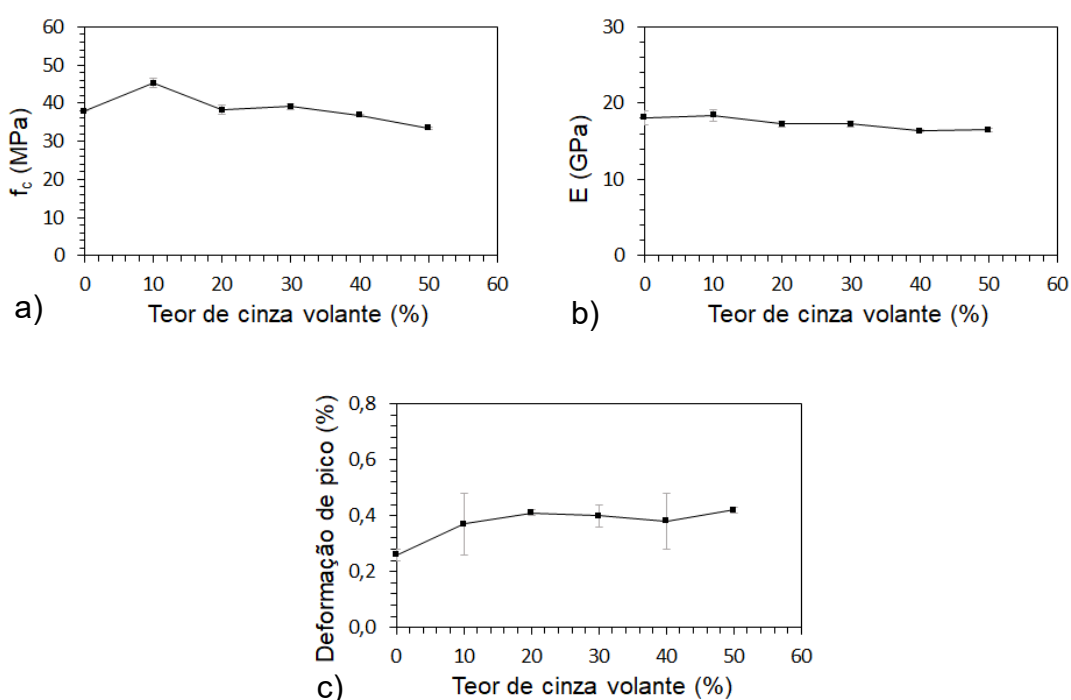


Figura 53 - Relação do teor de cinza volante com (a) resistência à compressão, (b) Módulo de Elasticidade e (c) deformação de pico dos compósitos.

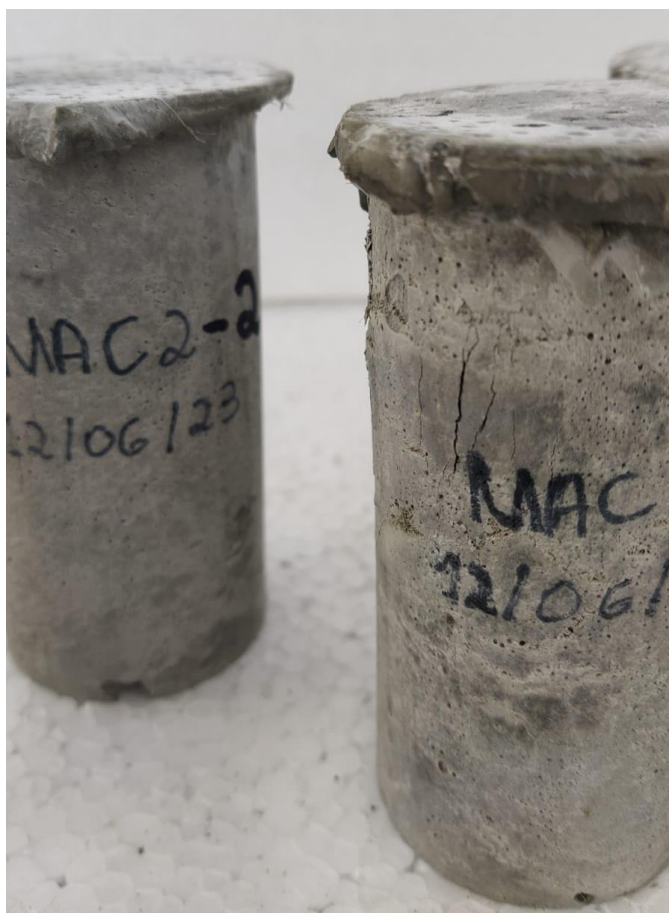


Figura 54 – Corpos de prova após exposição à carga de compressão axial.

A deformação de pico em um compósito se refere à máxima extensão ou deformação que o material compósito pode experimentar antes de falhar ou sofrer danos permanentes. Em termos mais simples, é a quantidade máxima de deformação que um compósito pode suportar antes de atingir seu limite de resistência.

Ao observar a Figura 53c e a Tabela 16 entende-se que a deformação de pico é inversamente proporcional ao Módulo de Elasticidade, pois misturas com maiores valores de Módulo de Elasticidade apresentam menor deformação de pico. Pelos resultados é possível ver que a mistura contendo apenas cinza volante apresenta o maior valor, seguidamente das misturas MC30CV20 e MC20CV30 que apresentam teores semelhantes de MK e CV, entendendo-se que quando há teores semelhantes de MK e CV há uma melhora na ductilidade e capacidade de absorção de energia.

3.2.3.2 Flexão

As Figuras 55, 56, 57 e 58 mostram as curvas tensão vs. deflexão obtidas nos ensaios de flexão, e a Tabela 17 mostra os valores médios de tensão na primeira fissura, deflexão na primeira fissura, tensão máxima e deflexão na ruptura.

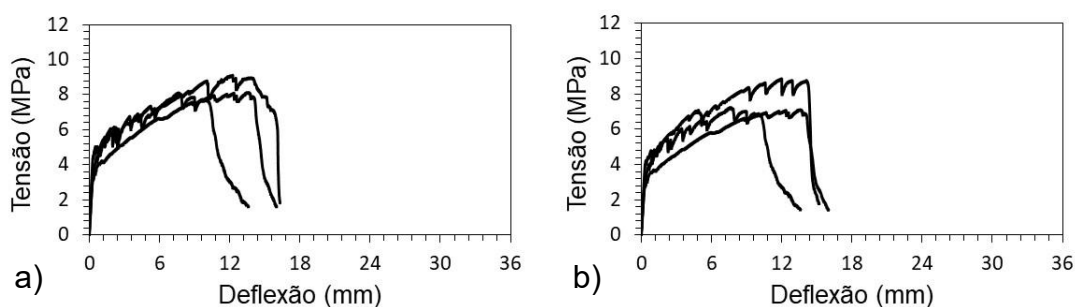


Figura 55 – Curvas de tensão vs. deflexão das misturas (a) MC50 e (b) MC40CV10 sob carga de flexão.

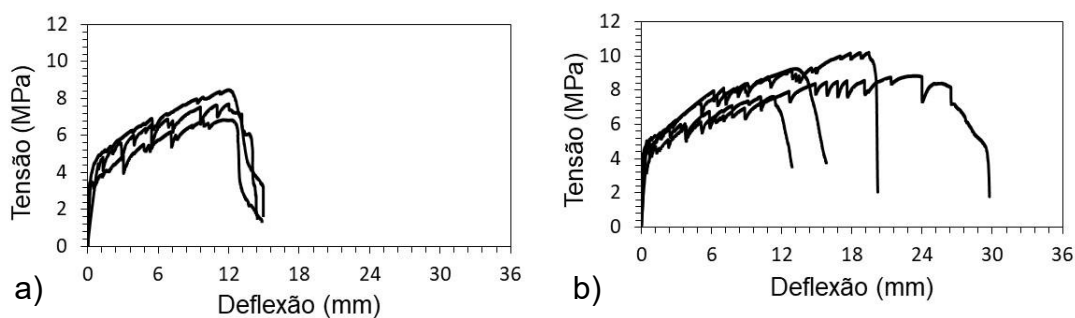


Figura 56 - Curvas de tensão vs. deflexão das misturas (a) MC30CV20 e (b) MC20CV30 sob carga de flexão.

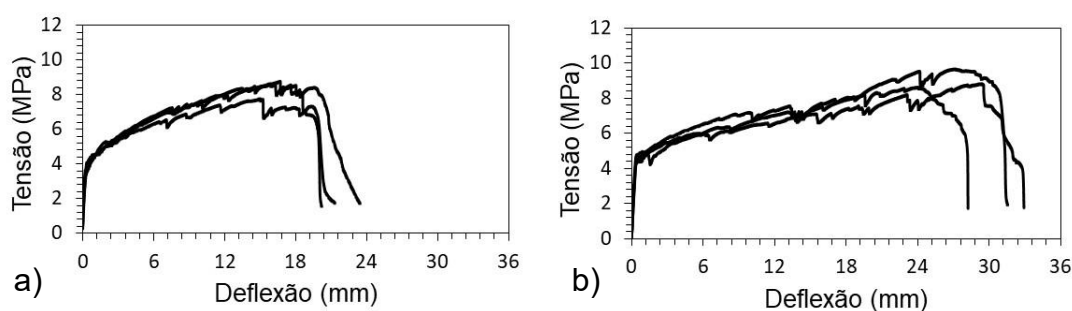


Figura 57 – Curvas de tensão vs. deflexão das misturas (a) MC10CV40 e (b) CV50 sob carga de flexão.

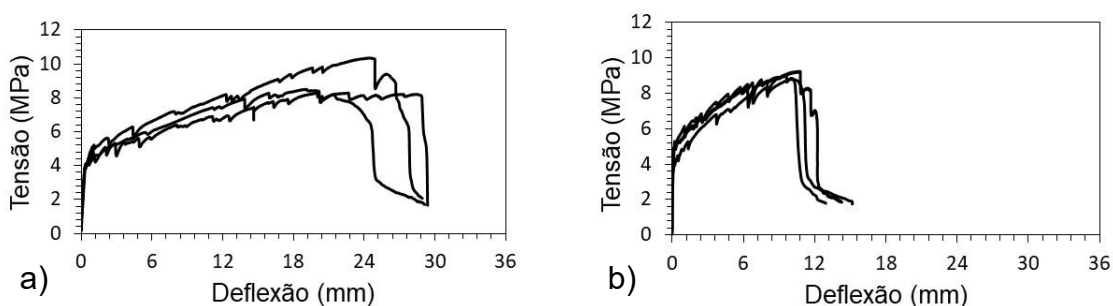


Figura 58 – Curvas de tensão vs. deflexão das misturas (a) CV1CV1 e (b) CV2CV2 sob carga de flexão.

Tabela 17 – Parâmetros dos ensaios de flexão nos compósitos.

Misturas	Tensão primeira fissura (MPa)	Deflexão primeira fissura (MPa)	Tensão máxima (MPa)	Deflexão na ruptura (mm)
MC50	3,98 (0,36)	0,32 (0,02)	8,46 (0,47)	12,87 (1,79)
MC40CV10	3,91 (0,36)	0,31 (0,02)	7,75 (0,80)	12,82 (1,95)
MC30CV20	3,69 (0,44)	0,30 (0,04)	7,70 (0,66)	13,50 (2,00)
MC20CV30	3,46 (0,62)	0,29 (0,08)	9,01 (0,92)	17,06 (5,00)
MC10CV40	3,59 (0,30)	0,27 (0,05)	8,40 (0,44)	19,70 (0,12)
CV50	4,48 (0,25)	0,39 (0,03)	9,05 (0,45)	26,90 (2,25)
CV1	3,90 (0,60)	0,35 (0,04)	9,05 (0,93)	25,32 (2,85)
CV2	4,86 (0,33)	0,22 (0,02)	8,99 (0,18)	10,84 (0,90)

Para melhor análise dos resultados, na Figura 59 foram plotadas as curvas de tensão de primeira fissura, deflexão de primeira fissura, tensão máxima e deflexão de ruptura em relação ao teor de cinza volante. Tensão e deflexão na primeira fissura são dados coletados na primeira queda visível do gráfico de tensão de flexão vs. deflexão. Diferentemente da resistência à compressão, o valor de tensão na primeira fissura foi maior na mistura CV50. Enquanto as outras misturas obtiveram valores bem semelhantes, como mostra a Figura 59a. Em relação às misturas CV1 e CV2, a diminuição da relação a/mc é o fator responsável pelo aumento na tensão da primeira fissura.

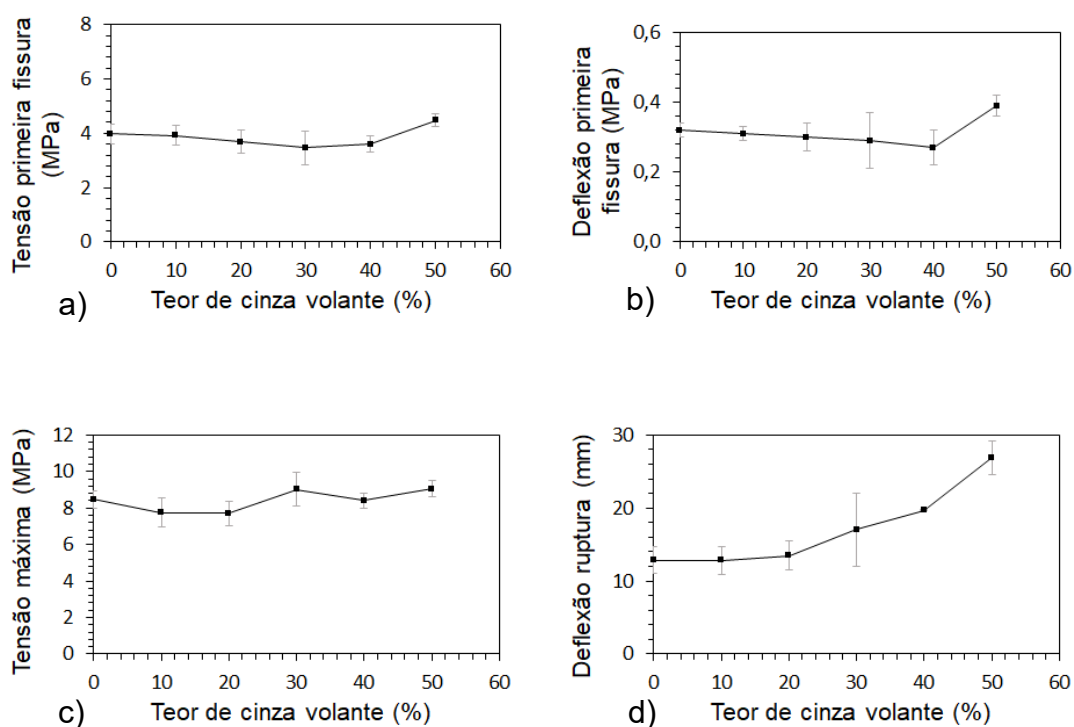


Figura 59 - Relação do teor de cinza volante na mistura com a (a) tensão de primeira fissura, (b) deflexão de primeira fissura, (c) tensão máxima e (d) deflexão na ruptura dos compósitos.

Já em relação à deflexão na primeira fissura é possível observar que não houve muita variação nos valores das misturas MC50, MC40CV10, MC30CV20, MC20CV30 e MC10CV40. No entanto, houve um considerável aumento na mistura CV50, que

apresentou o maior valor da deflexão na carga de primeira fissura, uma vez que a cinza volante tem uma maior colaboração na tenacidade de um compósito.

Da mistura CV1 para a mistura CV2, houve uma diminuição de, aproximadamente, 37% no valor da deformação de primeira fissura, consequência da diminuição da relação a/mc .

Quanto à tensão máxima, é possível notar que quando o cimento é substituído por somente cinza volante, notoriamente a mistura CV50 apresenta melhores valores quando comparada à mistura com somente metacaulinita (MC50). Já nas misturas que utilizam os dois tipos de adição fica explícito, mais uma vez, que a mistura MC20CV30 apresenta valor mais satisfatório, que pode ser defendido pelo uso conjunto de pozolanas.

As misturas com maior teor de cinza volante apresentam maiores valores de deflexão na ruptura. Comparando as misturas MC50 e CV50, é possível observar um aumento de, aproximadamente, 109%, influenciado pelas características da CV, que é capaz de impactar a ductilidade e a resposta à carga da estrutura, por conta da melhor trabalhabilidade que a mesma proporciona às misturas, demonstrando assim que a mistura com adição de apenas cinza volante teve a capacidade de apresentar uma maior curvatura (deflexão no meio do vão). A Figura 60 apresenta um corpo de prova de compósito ao final do ensaio de flexão, mostrando as fissuras na área tracionada.

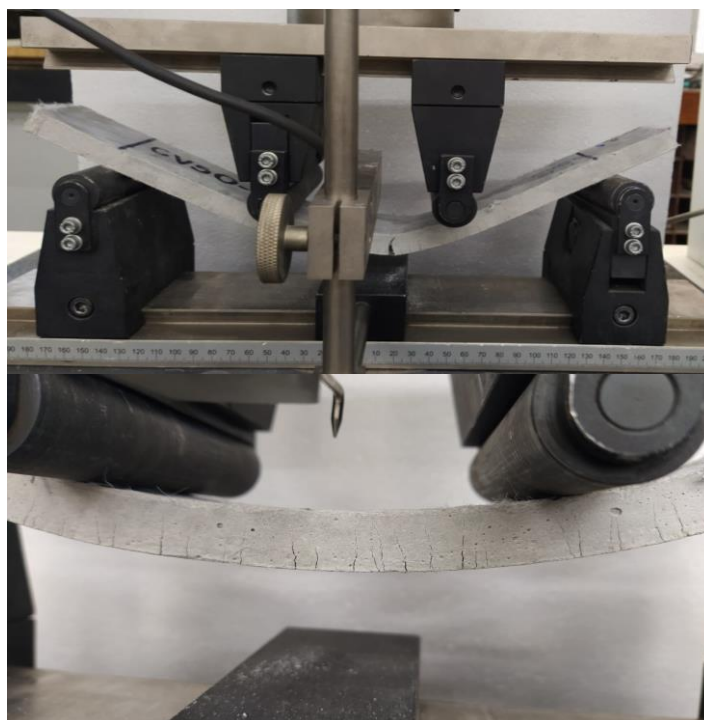


Figura 60 – Configuração de corpos de prova após ação de carga de flexão.

Além dos resultados já discutidos, é possível observar, na Figura 61, o padrão de fissuração dos corpos de prova das diferentes misturas na região tracionada da amostra quando submetida ao ensaio de flexão. Esse padrão teve grande contribuição das fibras na mistura. Conforme a carga foi aumentando ocorreram múltiplas microfissuras na matriz do compósito, sem o rompimento total das mesmas. Na Tabela 18 é possível observar que a mistura CV50 apresentou o maior número de fissuras, devido ao maior valor de deflexão no meio do vão, o que causou também uma maior resistência pós-fissuração.

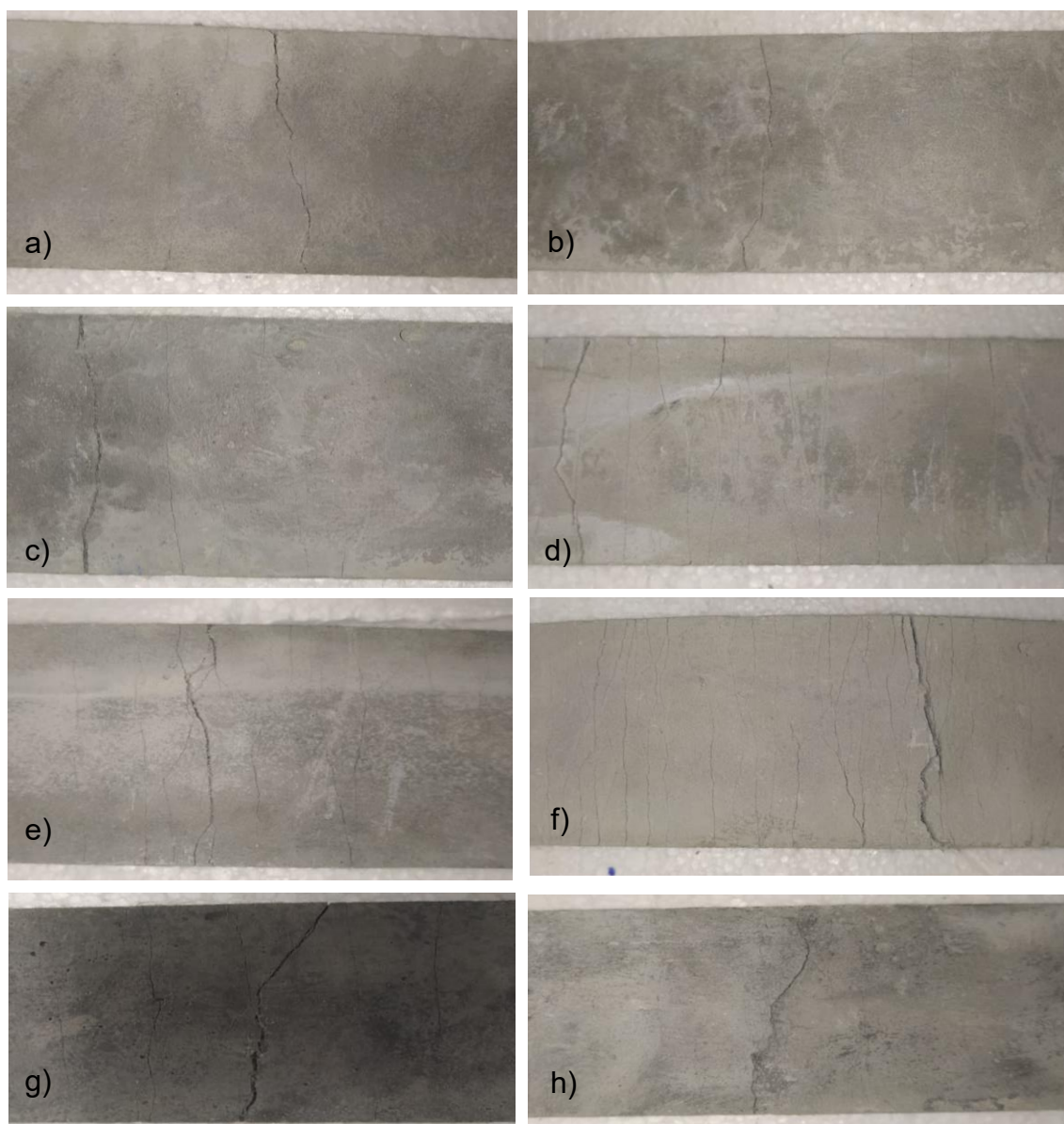


Figura 61 - Corpos de prova das misturas (a) MC50, (b) MC40CV10, (c) MC30CV20, (d) MC20CV30, (e) MC10CV40, (f) CV50, (g) CV1 e (h) CV2 após ensaios de carga de flexão.

Tabela 18 – Quantidade média de fissuras dos corpos de prova de flexão.

Misturas	Quantidade média de fissuras por corpo de prova
MC50	13 (4)
MC40CV10	21 (0)
MC30CV20	21 (1)
MC20CV30	24 (4)
MC10CV40	27 (2)
CV50	54 (3)
CV1	19 (0)
CV2	12 (0)

Na Figura 62a é possível observar uma correlação entre a tenacidade à fratura da matriz e a capacidade de deflexão do compósito e na Figura 62b a relação entre a energia de fratura e a capacidade de deflexão do compósito. Podemos observar que, quanto menores são as tenacidades e energias de fratura da matriz, maior é a capacidade de deflexão.

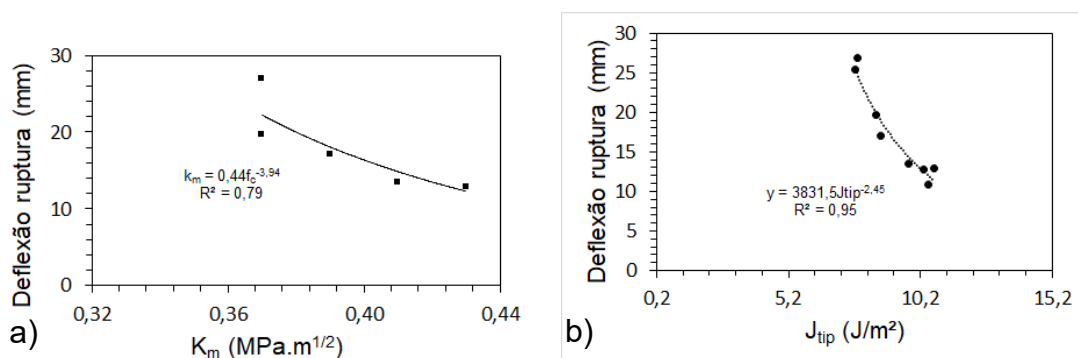


Figura 62 – Relação entre (a) tenacidade à fratura (k_m) das argamassas e deflexão de ruptura dos compósitos e (b) energia de fratura (J_{tip}) das argamassas e deflexão de ruptura dos compósitos.

3.2.3.3 Tração direta

As Figuras 63, 64, 65 e 66 mostram as curvas tensão vs. deformação obtidas nos ensaios de tração direta, e a Tabela 19 mostra os valores médios de tensão na primeira fissura, deformação na primeira fissura, tensão e deformação máxima e módulo de elasticidade dos compósitos. De maneira geral, as diferentes misturas apresentaram elevada capacidade de deformação com formação de múltiplas fissuras, sendo classificadas como SHCC (compósitos cimentícios do tipo *strain hardening*).

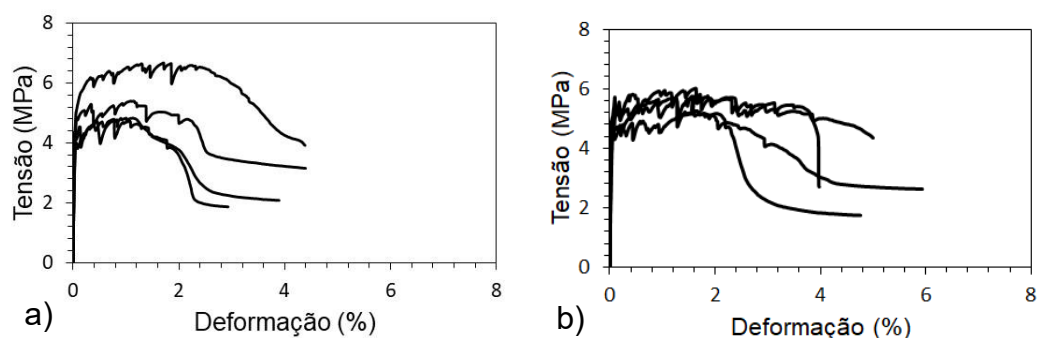


Figura 63 – Curvas tensão vs. deformação das misturas (a) MC50 e (b) MC40CV10 sob carga de tração direta.

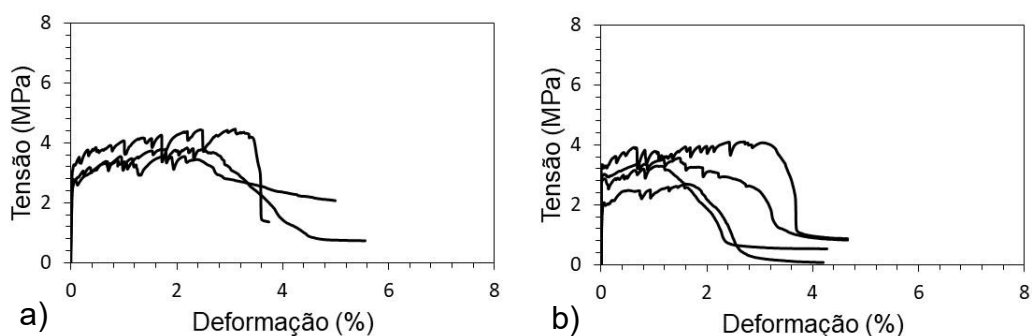


Figura 64 - Curvas tensão vs. deformação das misturas (a) MC30CV20 e (b) MC20CV30 sob carga de tração direta.

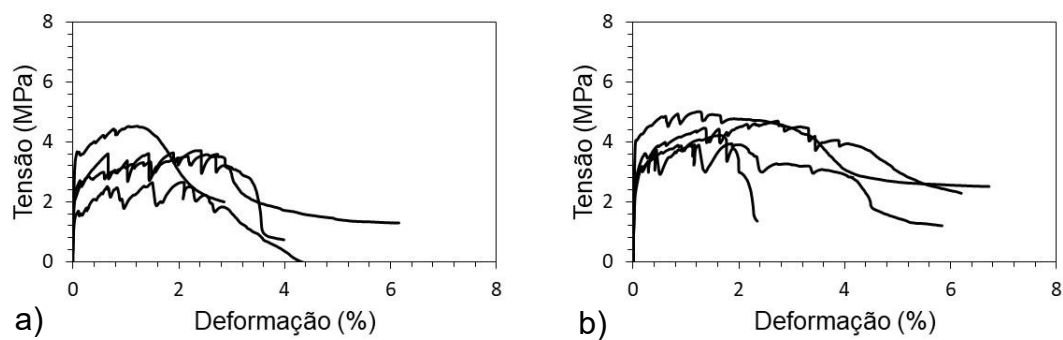


Figura 65 - Curvas tensão vs. deformação das misturas (a) MC10CV40 e (b) CV50 sob carga de tração direta.

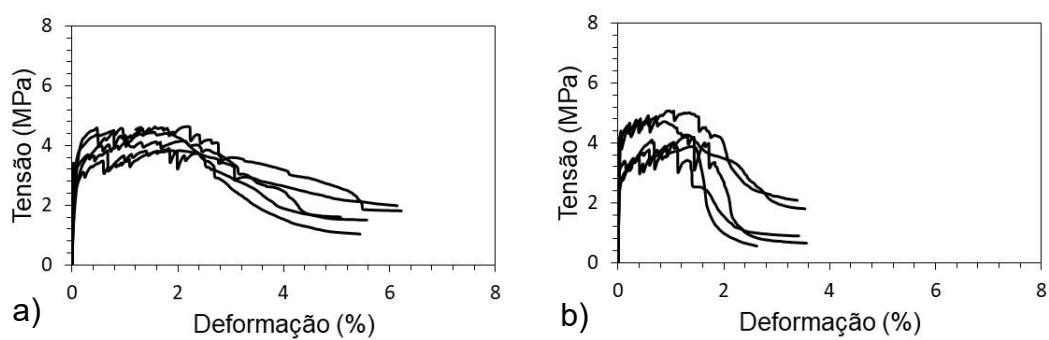


Figura 66 - Curvas tensão vs. deformação das misturas (a) CV1 e (b) CV2 sob carga de tração direta.

Tabela 19 - Parâmetros obtidos nos ensaios de tração direta nos compósitos.

Misturas	Tensão primeira fissura (MPa)	Deformação primeira fissura (%)	Tensão máxima (MPa)	Deformação (%)	E (GPa)
MC50	4,25 (0,39)	0,03 (0,01)	5,41 (0,73)	1,89 (0,39)	15,35 (1,07)
MC40CV10	4,31 (0,42)	0,03 (0,01)	5,65 (0,55)	2,39 (0,68)	15,55 (1,54)
MC30CV20	3,04 (0,33)	0,03 (0,00)	3,96 (0,36)	2,50 (0,24)	15,51 (2,60)
MC20CV30	2,97 (0,15)	0,03 (0,01)	3,65 (0,34)	2,40 (0,57)	14,24 (0,46)
MC10CV40	2,84 (0,42)	0,03 (0,01)	3,62 (0,66)	2,45 (0,59)	13,70 (2,86)
CV50	2,98 (0,58)	0,05 (0,02)	4,46 (0,41)	2,74 (0,56)	13,40 (1,75)
CV1	3,29 (0,54)	0,05 (0,03)	4,21 (0,32)	2,38 (0,27)	12,25 (1,71)
CV2	3,64 (0,69)	0,02 (0,01)	4,65 (0,68)	1,67 (0,21)	15,60 (2,99)

Observa-se que, quando 50% do cimento é substituído por 50% de metacaulinita (MC50) ou 40% de metacaulinita + 10% de cinza volante (MC40CV10) o valor de tensão na primeira fissura é maior, o que pode significar que a metacaulinita impacta mais positivamente que a cinza volante nessa propriedade.

A presença de adições minerais como a metacaulinita pode melhorar a microestrutura do compósito, isso pode resultar em uma distribuição mais uniforme de poros e partículas, contribuindo para um aumento na resistência do compósito, aqui manifestado na resistência de primeira fissura. Em geral, quando o teor de MK é reduzido na mistura, a tensão de primeira fissura tende a ser reduzida, como mostra a Figura 67a. Já em relação às misturas CV1 e CV2, o valor aumentou devido à diminuição da relação a/mc.

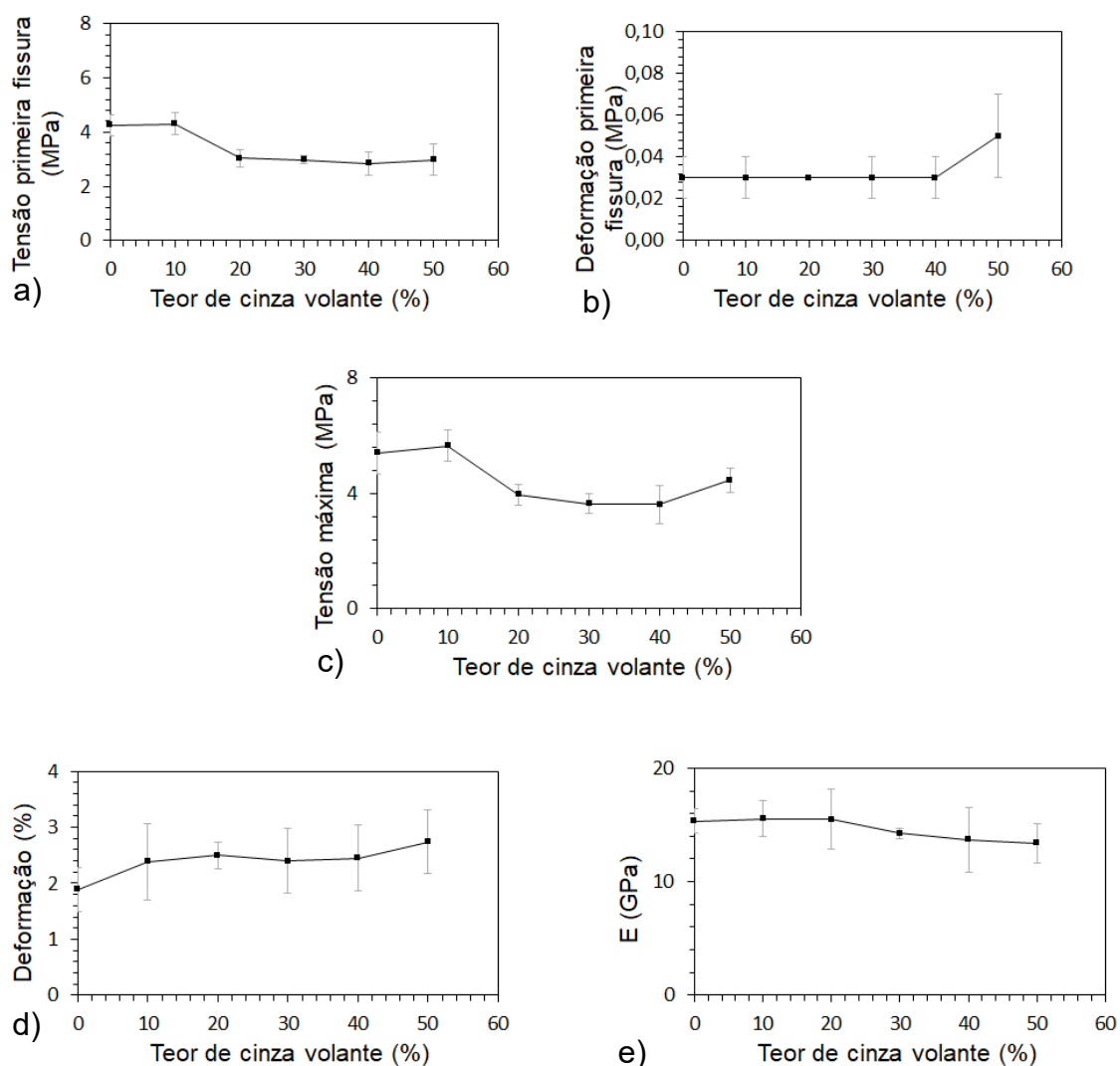


Figura 67 - Relação do teor de cinza volante com (a) tensão de primeira fissura, (b) deformação de primeira fissura, (c) tensão máxima, (d) deformação e (e) Módulo de Elasticidade dos compósitos.

Já em relação à deformação na primeira fissura a mistura CV50 apresenta maior valor (Figura 67b), uma vez que a adição de cinza volante pode contribuir para a maior deformabilidade da matriz do compósito. Quando comparamos as misturas CV1 e CV2, fica notório que CV2 apresenta menor valor, isso porque, segundo Atrushi (2003), quanto menor a relação água/material cimentício, menor a capacidade de deformar-se antes de seu rompimento.

Quanto à tensão máxima, os maiores valores aparecem nas misturas MC50 e MC40CV10, como mostra a Figura 67c, as quais apresentam maiores teores de metacaulinita, pois a reação pozolânica da metacaulinita com os produtos da

hidratação do cimento pode resultar em uma matriz mais densa, aumentando a capacidade do compósito de resistir às forças de tração. Observadas as misturas CV1 e CV2, a última apresenta melhora na máxima tensão pós-fissuração, uma vez que a relação a/mc mais baixa geralmente resulta em uma melhor resistência à tração, pois reduz a porosidade.

Em relação à deformação, há uma tendência de aumento com o aumento do teor de cinza volante até 20% (MC30CV20), com posterior redução da capacidade de deformação para 30% de cinza volante (MC20CV30), seguida de um novo aumento até a mistura CV50. Já a mistura CV2 apresenta menor capacidade de deformação, quando comparada à mistura CV1 (Figura 67d), isso porque quanto menor a relação água/material cimentício menor a capacidade de deformar-se antes de seu rompimento. A redução da tenacidade ao fraturamento com o aumento do teor de cinza volante na mistura, encontrada no item 3.1.5 é um indicativo de aumento da capacidade de deformação dos compósitos, no entanto, essa relação também depende da aderência fibra-matriz, segundo conceitos micromecânicos utilizados na dosagem de compósitos do tipo SHCC (LI et al., 1984).

A Figura 68 mostra os corpos de prova com múltiplas microfissuras após ensaio de tração direta. Ressalta-se a necessidade de uma lupa para contabilizá-las, visto que a maioria das fissuras não podiam ser vistas a olho nu.

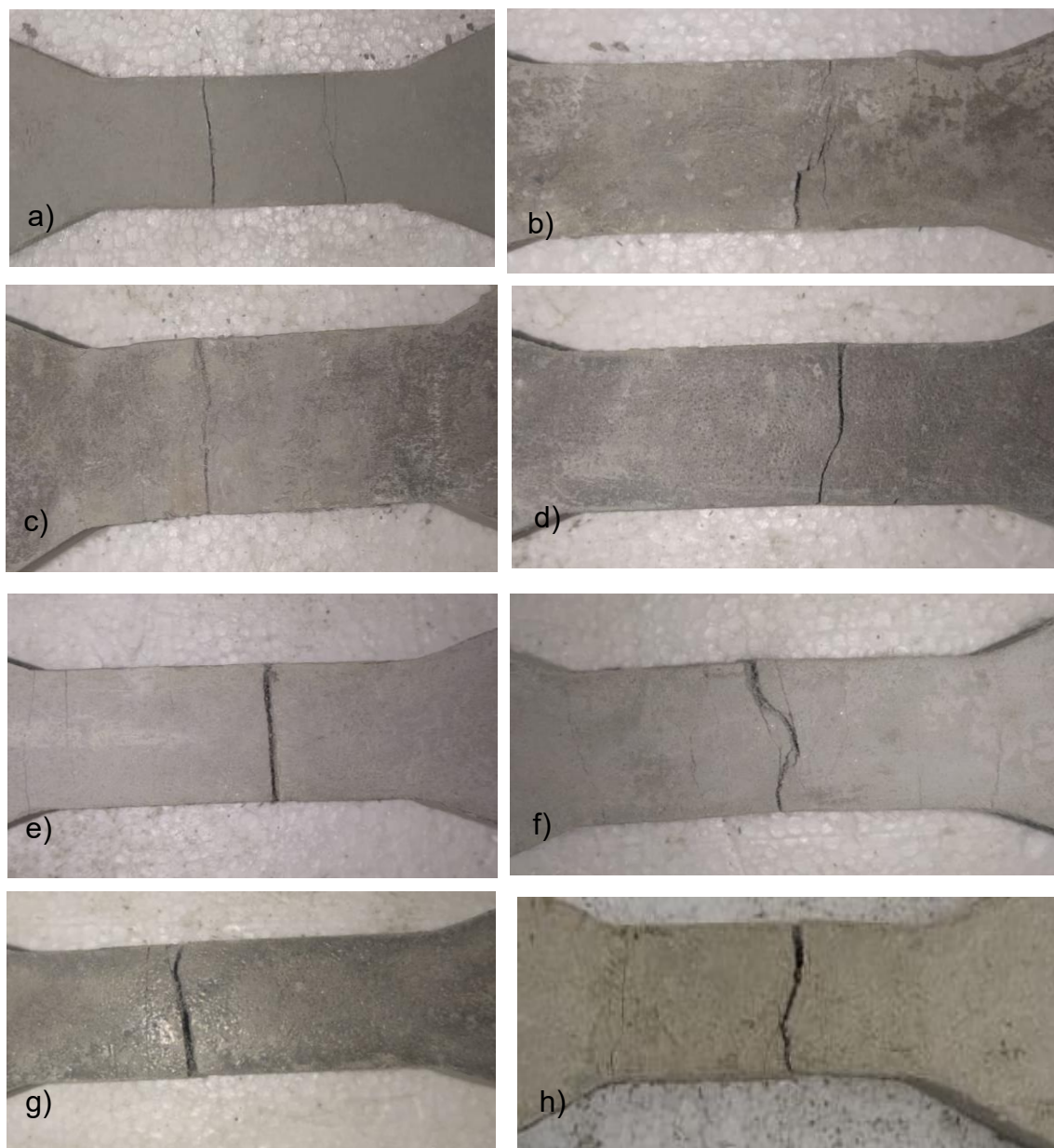


Figura 68 – Modo de ruptura e as fissuras dos corpos de prova das misturas (a) MC50, (b) MC40CV10, (c) MC30CV20, (d) MC20CV30, (e) MC10CV40, (f) CV50, (g) CV1 e (h) CV2 após serem expostos a carga de tração direta.

Na Figura 69 é possível observar as fissuras aparentes após ensaio de tração direta e na Tabela 20 a quantidade média de fissuras por corpo de prova.



Figura 69 – Fissuras aparentes no corpo de prova após ensaio de tração direta.

Tabela 20 – Quantidade média de fissuras dos corpos de prova de tração.

Misturas	Quantidade média de fissuras por corpo de prova
MC50	21 (0)
MC40CV10	22 (2)
MC30CV20	28 (1)
MC20CV30	14 (2)
MC10CV40	17 (2)
CV50	26 (2)
CV1	20 (0)
CV2	10 (0)

As misturas MC50, MC40CV10 e MC30CV20 apresentam maiores valores de módulo de elasticidade, de acordo com a Figura 67e. Assim como na resistência à compressão, os maiores valores de módulo de elasticidade são referentes às misturas

que apresentam maior teor de MK e menor teor de CV, pois segundo Barbosa (2019) a metacaulinita é uma pozolana que reage com o hidróxido de cálcio liberado durante a hidratação do cimento Portland. Essa reação pode levar à formação de produtos adicionais que preenchem os poros na matriz do compósito e uma microestrutura mais refinada e densa, geralmente está associada a um aumento no módulo de elasticidade. Quanto às misturas CV1 e CV2, menor relação água-material cimentício geralmente resulta em compósito mais denso e, portanto, um módulo de elasticidade mais alto.

3.2.4 Dureza superficial

A Tabela 21 apresenta os valores dos índices esclerométricos médios efetivos, que representa a dureza superficial do corpo de prova e suas respectivas resistência à compressão obtidas nos corpos de prova utilizados nos ensaios de dureza superficial.

Tabela 21 – Valores das durezas, obtidos pelo índices esclerométricos dos diferentes compósitos.

Misturas	Dureza superficial média
MC50	46,17 (0,90)
MC40CV10	45,91 (0,55)
MC30CV20	43,92 (0,81)
MC20CV30	44,94 (0,71)
MC10CV40	41,13 (1,54)
CV50	41,50 (1,66)
CV1	36,25 (0,26)
CV2	43,18 (0,82)

Esse índice é uma medida da resistência superficial de um material, referente à penetração ou deformação. É frequentemente utilizado para avaliar a capacidade de resistir ao desgaste superficial. Observando os dados apresentados é possível

observar que as misturas MC50 e MC40CV10 apresentam os maiores valores de dureza superficial, que pode ser explicado pela influência da metacaulinita na dureza superficial dos compósitos, pois como visto na discussão dos outros ensaios, esta adição mineral é responsável pela melhoria das características físicas e mecânicas dos mesmos. Outro fator a ser notado é redução da dureza superficial com a redução do teor de metacaulinita na mistura.

A dureza da mistura CV2 apresentou um aumento de aproximadamente 25% em comparação a dureza da mistura CV1, consequência da diminuição do fator água/material cimentício na mistura CV2 e consequente aumento da resistência à compressão do compósito.

3.3 Erosão em compósitos e no concreto reparado

A Tabela 22 apresenta os valores da consistência (*slump*) e massa específica fresca, porosidade, absorção de água, massa específica, resistência à compressão e módulo de elasticidade do concreto utilizado como substrato.

Tabela 22 – Propriedades do concreto.

Concreto fresco		Concreto endurecido		
Consistência (cm)	Massa específica (g/cm ³)	Porosidade (%)	Absorção de água (%)	Massa específica (g/cm ³)
11,10	2,90	8,12 (0,29)	4,02 (0,09)	2,30 (0,01)
Propriedades mecânicas				
f_c (MPa)		E (GPa)		
29,54 (1,18)		20,59 (0,95)		

As Figuras 70, 71, 72 e 73 mostram as curvas da perda de volumes, devido à erosão no tempo, das diferentes misturas de compósitos. Já a Tabela 23 indica os valores médios e respectivos desvios padrões, dos desgastes volumétricos nas primeiras 12h e ao final dos testes, em 72h.

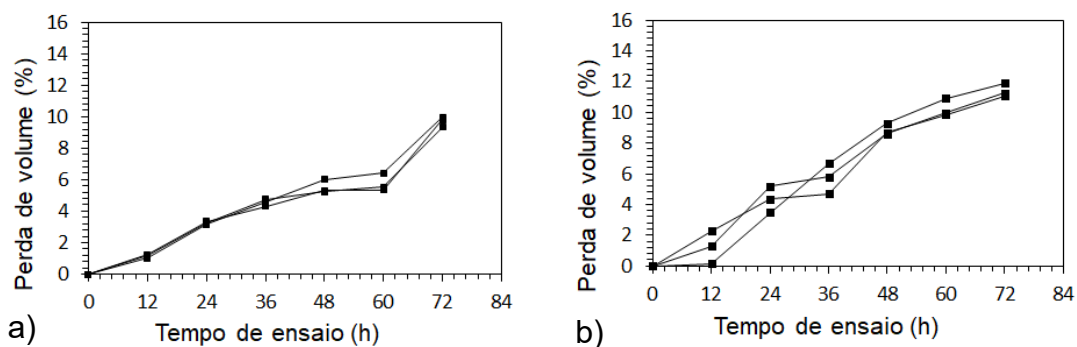


Figura 70 – Curvas do tempo de ensaio vs. desgaste volumétrico das misturas (a) MC50 e (b) MC40CV10.

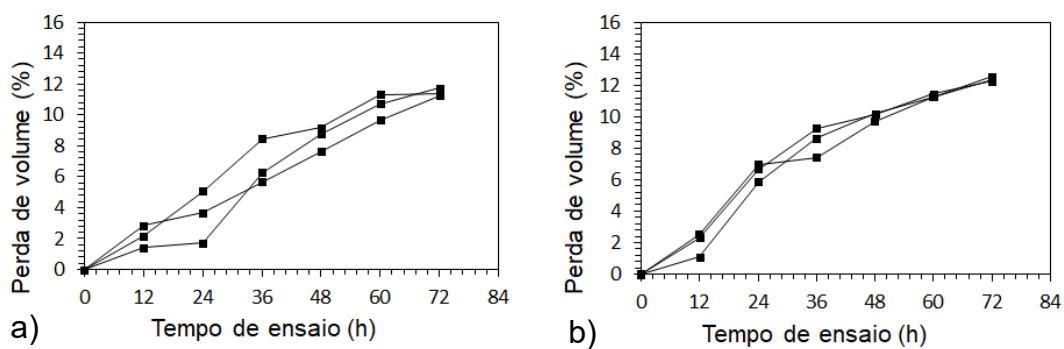


Figura 71 - Curvas do tempo de ensaio vs. desgaste volumétrico das misturas (a) MC30CV20 e (b) MC20CV30.

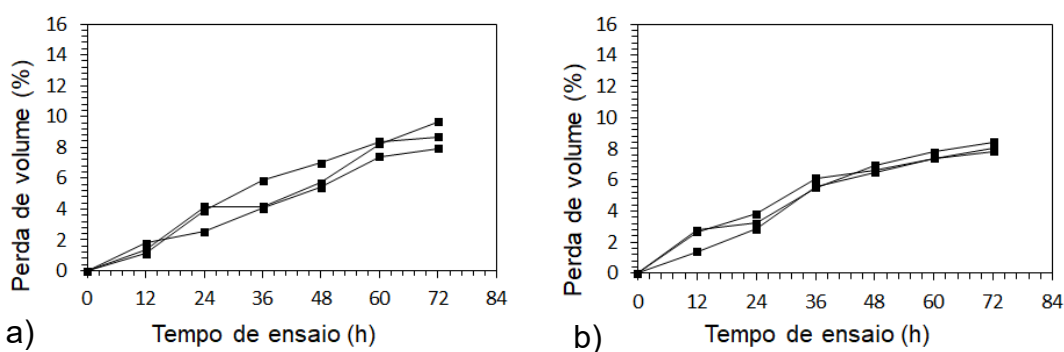


Figura 72 - Curvas do tempo de ensaio vs. desgaste volumétrico das misturas (a) MC10CV40 e (b) CV50.

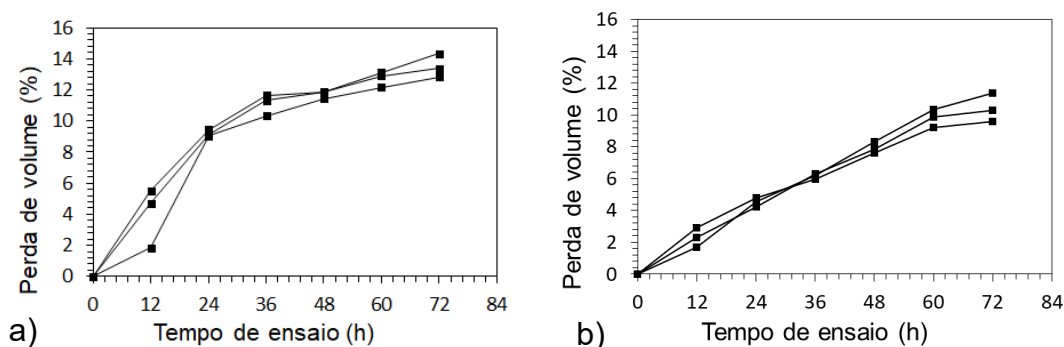


Figura 73 - Curvas do tempo de ensaio vs. desgaste volumétrico das misturas (a) CV1 e (b) CV2.

Tabela 23 – Resultados dos desgastes por erosão em 12h e 72h nos diferentes compósitos.

Misturas	Volume médio perdido nas primeiras 12 h (%)	Volume médio perdido em 72 h (%)
MC50	1,15 (0,09)	9,69 (0,26)
MC40CV10	1,23 (0,86)	11,41 (0,35)
MC30CV20	2,13 (0,59)	11,43 (0,20)
MC20CV30	1,97 (0,63)	11,80 (0,54)
MC10CV40	1,44 (0,20)	8,76 (0,70)
CV50	2,20 (0,72)	8,08 (0,24)
CV1	4,14 (1,41)	13,50 (0,63)
CV2	2,27 (0,47)	10,41 (0,73)

As misturas MC50, MC40CV10, MC30CV20, MC20CV30, MC10CV40 e CV50 são as misturas que foram moldadas como uma camada de reparo com 2,5 cm de espessura.

Nas primeiras 12 horas de ensaio, o desgaste aumentou com o aumento do teor de cinza volante, ou redução do teor de metacaulinita na mistura, como mostra a Tabela 23. O desgaste inicial é relacionado com a dureza superficial dos compósitos, no entanto, este fator pode ser alterado devido ao acabamento da superfície dos corpos de prova, que também interfere no comportamento erosivo (RODRIGUES e MONTARDO, 2002). Analisando-se conjuntamente estes dados com os resultados de dureza superficial (ver Figura 74), temos um indicativo, uma vez que as misturas MC50

e MC40CV10, com menores perdas de volume, obtiveram maiores durezas superficiais, ressaltando assim o paralelismo entre essas duas propriedades.

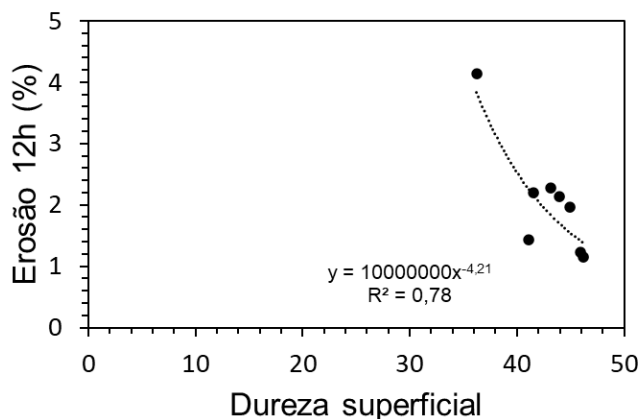


Figura 74 - Correlação entre a dureza superficial e o desgaste por erosão dos compósitos.

Outro fator que também influencia o desgaste erosivo, é, segundo Dan'kin (1970), o módulo de elasticidade dos compósitos (ver Figura 75). Isto poderia explicar a melhorada resistência à erosão da mistura MC10CV40 após 12h de testes.

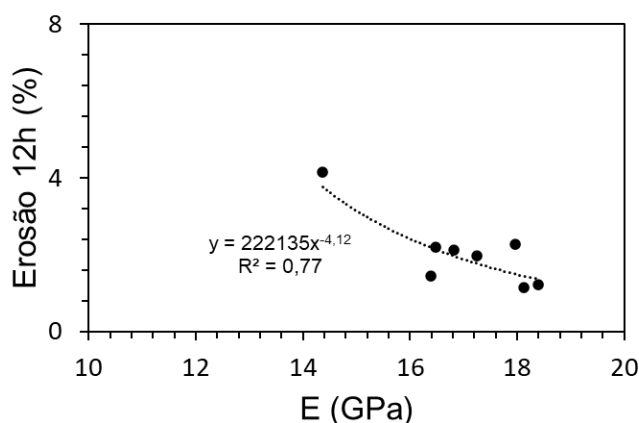


Figura 75 - Correlação entre o módulo de elasticidade e o desgaste por erosão dos compósitos.

O gráfico na Figura 76 mostra que de uma maneira geral as misturas MC50, MC10CV40 e CV50 foram as que apresentaram menor desgaste por erosão. Isso se

deve à influência das adições minerais utilizadas individualmente, ou a combinação de 10% de metacaulinita + 40% de cinza volante, que podem afetar a resistência à erosão de várias formas. Ao observar o IAP da cinza volante e da metacaulinita, fica notório que a segunda tem mais reatividade, isso explica o porquê a MC50 apresentou melhor desempenho a erosão em relação a CV50. Além disso, sua distribuição e aderência na matriz também desempenharam um papel crucial, uma vez que uma distribuição uniforme e uma boa adesão entre as partículas e a matriz podem resultar em uma maior resistência à erosão [KHOSHNOUD & ABU-ZAHRA, 2018]. No entanto, uma distribuição desigual ou uma aderência inadequada tem como consequência partículas da adição mineral não reagindo, podendo levar a pontos fracos no material, aumentando sua suscetibilidade à erosão.

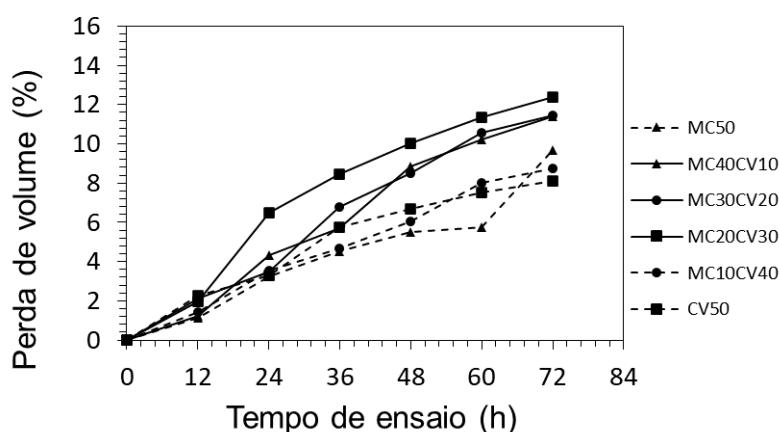


Figura 76 – Curva tempo de ensaio vs. desgaste volumétrico médio dos compósitos.

Comparando-se as misturas CV1 e CV2 (Tabela 23 e Figura 73), a mistura CV1 foi a que mais perdeu volume nas primeiras 12h, o que também foi confirmado ao final das 72 horas de ensaio. Neste caso, é visível que a diminuição da relação a/mc da mistura CV1 para a mistura CV2 resultou em redução de, aproximadamente, 23% da perda de volume do compósito, o que ratifica o que foi mencionado em outros ensaios presentes neste trabalho, a diminuição do fator a/mc é capaz de melhorar as propriedades dos compósitos.

As Figuras 77 e 78 mostram corpos de prova típicos de cada mistura, após os ensaios de erosão.

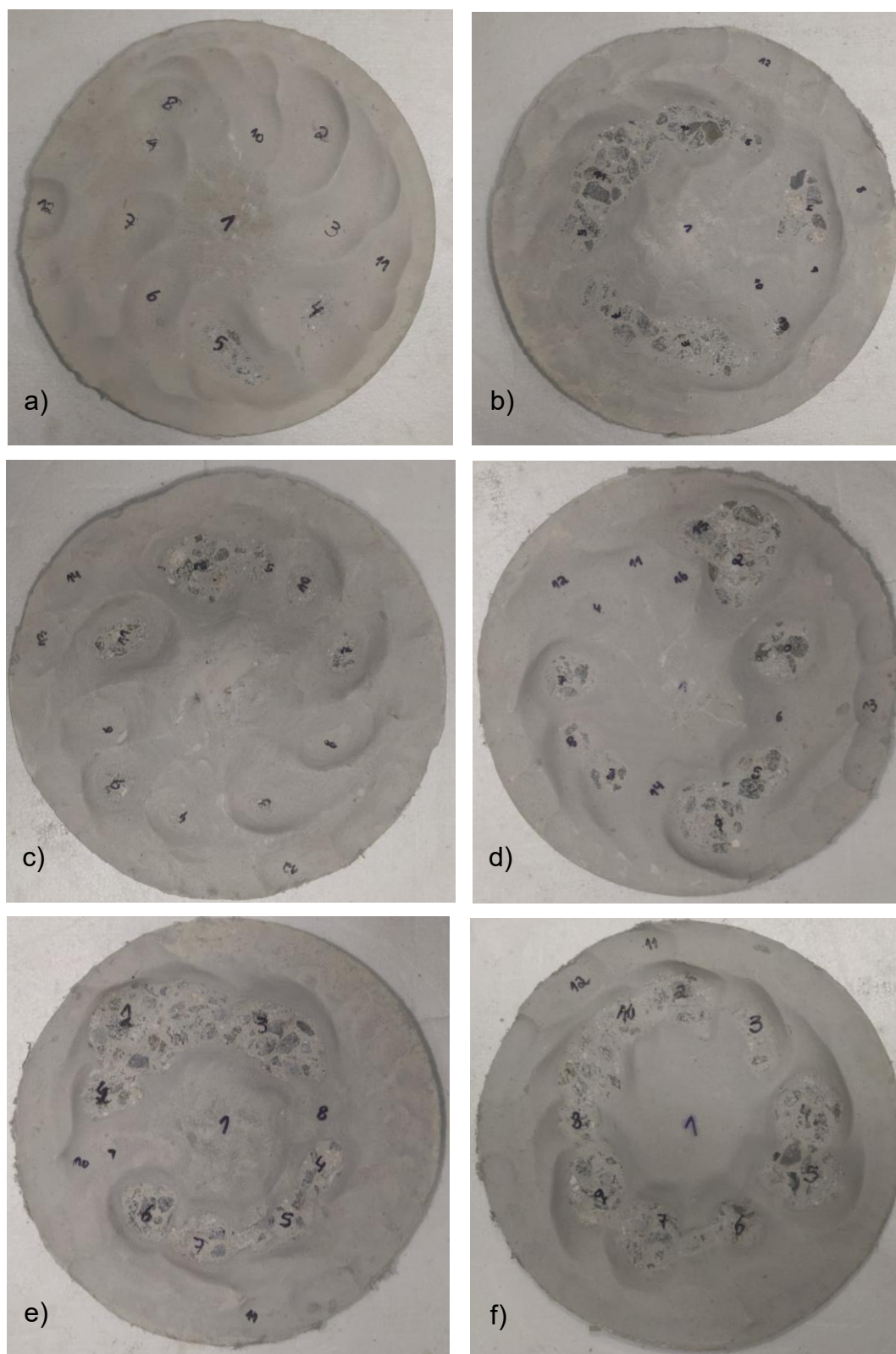


Figura 77 – Configuração dos conjuntos reparados das misturas (a) MC50, (b) MC40CV10, (c) MC30CV20, (d) MC20CV30, (e) MC10CV40 e (f) CV50 após expostos a ensaio de erosão.

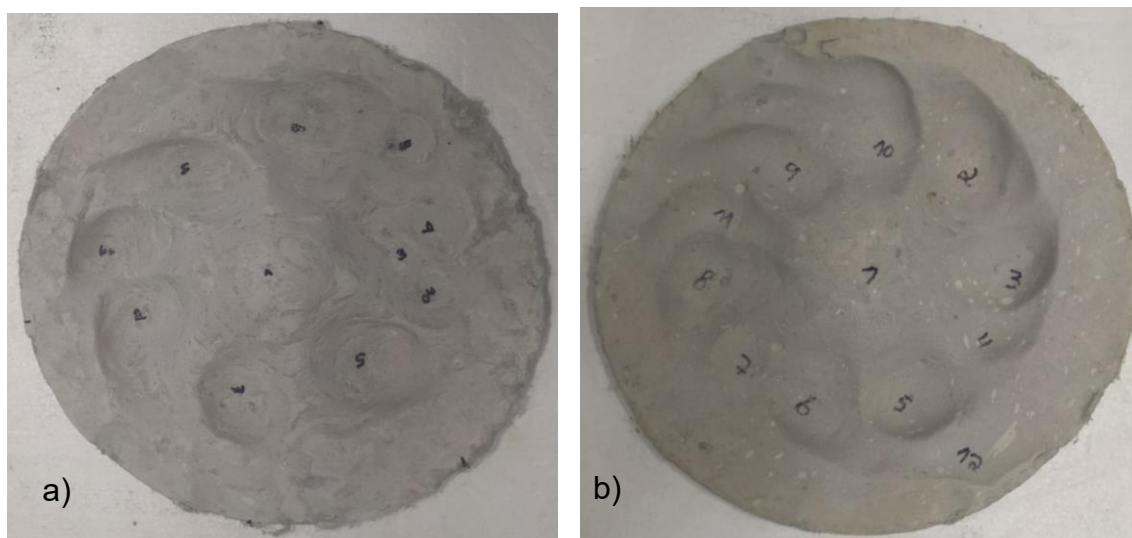


Figura 78 – Configuração dos compósitos das misturas (a) CV1 e (b) CV2 após expostos a ensaio de erosão.

Além de estudar a perda de volume das diferentes misturas, também foram encontradas as profundidades médias de desgaste dos corpos de prova, como exposto na Tabela 24, e também foram feitas medições com o paquímetro em 3 direções e em pontos enumerados com diferentes profundidades, evidentes nas Figuras 77 e 78, para cada corpo de prova, resultando assim em valores mínimos, máximos e médios dos desgastes, como mostra a Tabela 25.

Tabela 24 – Profundidade média dos corpos de prova expostos à erosão.

Misturas	Profundidade média de desgaste (cm)
MC50	0,97 (0,03)
MC40CV10	1,15 (0,04)
MC30CV20	1,16 (0,02)
MC20CV30	1,21 (0,04)
MC10CV40	0,87 (0,08)
CV50	0,85 (0,03)
CV1	1,37 (0,05)
CV2	1,06 (0,07)

Os resultados das profundidades médias são diretamente proporcionais aos resultados da perda de volume, deixando evidente que os conjuntos reparados MC50, MC10CV40 e CV50 apresentam menor profundidade média de desgaste superficial dos corpos de prova e as misturas MC40CV10, MC30CV20 e MC20CV30 apresentam maiores profundidades de desgastes superficiais.

Assim como na perda de volume, a profundidade do desgaste superficial do compósito CV1 diminuiu cerca de 25% quando foi reduzido o fator a/mc da mistura (CV2).

Tabela 25 – Valores das profundidades de desgaste dos compósitos e conjuntos reparados.

Misturas	Profundidade mínima de desgaste (cm)	Profundidade máxima de desgaste (cm)	Profundidade média de desgaste (cm)
MC50	1,11 (2,75)	3,11 (2,57)	2,22 (0,20)
MC40CV10	0,99 (0,39)	3,01 (1,05)	2,17 (2,11)
MC30CV20	0,86 (1,20)	3,25 (0,93)	2,52 (1,31)
MC20CV30	0,20 (0,45)	3,56 (2,92)	2,48 (2,28)
MC10CV40	0,14 (0,29)	3,23 (2,98)	2,15 (2,26)
CV50	0,44 (1,53)	3,05 (2,99)	2,15 (1,70)
CV1	0,29 (0,46)	4,51 (0,13)	2,98 (0,56)
CV2	0,41 (0,38)	3,62 (0,69)	2,65 (0,74)

Os valores das profundidades encontrados na Tabela 25 foram medidos com ajuda de um paquímetro, no intuito de descobrir as profundidades mínimas e máximas nas amostras. Assim, concluiu-se que 2,5 cm de espessura de cobrimento de SHCC não foi adequado para proteger o concreto da erosão, durante as 72 horas de ensaios, pois alguns pontos do substrato de concreto foram desgastado também, como mostra a Figura 77. O desgaste não foi o mesmo em todos os pontos dos corpos de prova devido aos movimentos despadronizados feitos pelas esferas submersas, quando em contato com as superfícies dos CPs, dessa maneira houve pontos em que o desgaste era mais superficial, enquanto em outros eram mais profundos.

Foi observado que os conjuntos reparados MC50, MC10CV40 e CV50 atingiram as camadas de concreto entre 60 e 72 horas, enquanto os conjuntos reparados MC40CV10, MC30CV20, MC20CV30 e os compósitos CV1 e CV2 atingiram entre 48 e 60 horas.

Nas análises comparativas em compósitos contendo diferentes proporções de cinza volante e metacaulinita, visando avaliar suas propriedades e potenciais aplicações, cada composição apresentou características únicas, sugerindo uma variedade de usos específicos. Enquanto algumas misturas demonstraram uma maior resistência mecânica, indicando um potencial para aplicações estruturais em setores da construção civil e engenharia, outras destacaram-se por propriedades como resistência à erosão, explicitando ideais para aplicações em ambientes adversos. Essas comparações fornecem *insights* valiosos para a seleção e otimização de compósitos de acordo com as exigências específicas de cada aplicação.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados dos ensaios experimentais mostraram que foi possível desenvolver reforços de SHCC para substratos de concreto utilizando adições de cinza volante e metacaulinita. Além disso, este trabalho analisou diferentes propriedades dos compósitos cimentícios com substituição parcial de cimento por metacaulinita e cinza volante. No estudo foi possível chegar as seguintes conclusões:

- Argamassas com maior teor de CV e com menor teor de água apresentaram menor porosidade e absorção de água;
- A redução da densidade nas argamassas com maior teor de cinza volante pode ser associada à menor densidade da CV em comparação com a densidade da MK, além de uma porosidade mais elevada nas misturas com maior teor de CV;
- A argamassa MC40CV10 apresentou o maior valor de resistência à compressão axial, indicando que, neste estudo, a combinação de 10% de CV e 40% de MK é o teor ótimo para a resistência à compressão;
- Acontece destruição parcial dos corpos de prova das argamassas quando expostas ao ensaio de compressão axial, consequência da não utilização de fibras em sua confecção;
- À medida que era reduzido o teor de metacaulinita e aumentava o teor de cinza volante, a resistência à compressão diametral das argamassas diminuía;
- O aumento no teor de metacaulinita e diminuição no teor de cinza volante aumentou a resistência à fratura das argamassas;
- A utilização de CV e MK com teores mais elevados de metacaulinita fornece uma otimização no valor final da porosidade dos compósitos;
- Os valores de absorção de água dos compósitos são diretamente proporcionais aos valores da porosidade;
- Houve decréscimo nos valores da massa específica dos compósitos à medida que diminuía os teores de metacaulinita e aumentavam os teores de cinza volante;
- A redução da massa específica dos compósitos com a diminuição do teor de metacaulinita e aumento do teor de cinza volante pode ser

consequência do aumento da porosidade e/ou da maior leveza da cinza volante quando comparada à metacaulinita;

- A mistura MC40CV10 apresentou maior valor de resistência à compressão, enquanto o aumento adicional na quantidade de CV (20%, 30%, 40% e 50%) e a consequente redução na quantidade de MK (30%, 20%, 10% e 0%) não demonstraram melhorias na resistência à compressão dos compósitos;
- A mistura MC50 apresenta maior resistência à compressão quando comparada à mistura CV50. Isso pode ser explicado pelo refinamento da matriz provocado pela adição de metacaulinita, tornando-a mais densa, além de ser mais reativa que a cinza volante, como demonstram os valores dos índices de atividade pozolânica;
- A deformação de pico é inversamente proporcional ao módulo de elasticidade dos compósitos, pois misturas com maiores valores de módulo de elasticidade apresentam menor deformação de pico;
- Os compósitos com teores semelhantes de MK e CV (MC30CV20 e MC20CV30) apresentam maiores deformações de pico, indicando suas melhores ductilidade e capacidade de absorção de energia;
- No ensaio de flexão foi possível notar que a mistura CV50 apresentou melhores valores de tensão máxima quando comparada à mistura MC50. Já nas misturas que utilizam os dois tipos de adição, a mistura MC20CV30 apresentou valor mais satisfatório, que pode ser defendido pelo uso conjunto de pozolanas, nas proporções de 20% (metacaulinita) e 30% (cinza volante);
- As misturas com maior teor de cinza volante apresentam maiores capacidade de deflexão, pois a cinza volante é capaz de impactar na ductilidade, por conta da melhor trabalhabilidade que a mesma proporciona às misturas;
- CV50 apresentou o maior número de fissuras, porém também obteve maiores valores de deflexão e tensão máxima;
- Quanto menor é a tenacidade maior é a capacidade de deflexão;
- No ensaio de tração, os maiores valores de tensão máxima aparecem nas misturas MC50 e MC40CV10;

- Quanto à deformação no ensaio de tração direta, houve uma tendência de aumento com a redução do teor de metacaulinita até 30% (MC30CV20), então acontece uma redução quando esse teor diminui para 20% (MC20CV30), seguida de um novo aumento até a mistura CV50.;
- Quanto menor a quantidade de metacaulinita e maior a quantidade de cinza volante, menor é o índice esclerométrico, pois a metacaulinita quando comparada à cinza volante tem maior impacto na dureza dos compósitos;
- No ensaio de erosão os conjuntos reparados MC50, MC10CV40 e CV50 foram as que apresentaram menor desgaste por erosão aos 72 dias, o que deixa explícito que essa característica não somente depende da resistência à compressão nesta idade;
- As misturas com menores desgastes iniciais (após 12h de ensaio), obtiveram maiores durezas superficiais e resistência à compressão, ressaltando assim o paralelismo entre essas propriedades;
- O compósito CV2 apresentou melhora no processo erosivo, comparado a mistura CV1, devido à diminuição da relação água/material cimentício;
- Os resultados das profundidades médias são diretamente proporcionais aos resultados da perda de volume;
- O desgaste não foi o mesmo em todos os pontos dos corpos de prova devido aos movimentos despadronizados feitos pelas esferas submersas quando em contato com as superfícies dos CPs, dessa maneira houve pontos em que os desgastes eram mais superficiais, enquanto em outros eram mais profundos;

REFERÊNCIAS

ABITANTE, A. L. R. Estimativa da vida útil de placas cerâmicas esmaltadas solicitadas por abrasão através de ensaios acelerados. 2004. Tese (Doutorado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

ABNT NBR 11579: Cimento Portland Comum – Determinação do módulo de finura. Rio de Janeiro, 2012.

ABNT NBR 12653: Materiais pozolânicos – Requisitos. Rio de Janeiro, 2015.

ABNT NBR 13276: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos- Preparo da mistura e determinação do índice de consistência. Rio de Janeiro, 2016.

ABNT 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, 1995.

ABNT NBR 15894-3: Metacaulim para uso com cimento Portland em concreto, argamassa e pasta – parte 3: determinação da finura por meio da peneira 45 µm. Rio de Janeiro, 2010.

ABNT NBR 16605: Cimento Portland e outros materiais em pó — Determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 2017.

ABNT NBR 16887: Concreto – Determinação do teor de ar em concreto fresco – Método pressométrico. Rio de Janeiro. 2020.

ABNT NBR 16889: Concreto - Determinação da Consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro. 2020.

ABNT NBR 16935:2021 - Projeto de Estruturas de Concreto Reforçado com Fibras - Procedimento 2021.

ABNT NBR 5739:2007 - Concreto: Ensaios de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2007.

ABNT NBR 5752: Materiais pozolânicos – determinação de atividade pozolânica com cimento Portland – índice de atividade pozolânica com cimento. Rio de Janeiro, 2014.

ABNT NBR 7222:2017 - Concreto e argamassa: Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2017.

ABNT NBR 7584: Concreto endurecido – Avaliação da dureza superficial pelo esclerômetro de reflexão. Rio de Janeiro: ABNT, 1995.

ABNT NBR 7682: Calda de cimento para injeção - Determinação do índice de fluidez. Rio de Janeiro, 2013.

ABNT NBR 8522:2017 - Concreto: Determinação dos módulos estáticos de elasticidade e de deformação à compressão. Rio de Janeiro, 2017.

ABNT NBR 9778. Argamassa e concreto endurecidos — Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro. 2009.

ABNT NBR 9833: Concreto fresco - Determinação da massa específica, do rendimento e do teor de ar pelo método gravimétrico. Rio de Janeiro, 2008.

ABNT NBR NM 248:2003 - Agregados: Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003.

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

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

ACI 544.4R-18. Guide for Design with Fiber-Reinforced Concrete. American Concrete Institute. Farmington Hills, Michigan, 2018.

ACI Committee 201. ACI 201.2R-92 - Guide to Durable Concrete. American Concrete Institute. Farmington Hills, Michigan, 1992.

ACI Committee 302. ACI 302.1R-04 - Guide for Concrete Floor and Slab Construction. American Concrete Institute. Farmington Hills, Michigan, 2004.

ALMEIDA, I. R. Influência da resistência à abrasão do agregado graúdo na resistência à abrasão de concretos de alto desempenho. In: REIBRAC-IBRACON, 42, Fortaleza/CE, 2000.

ANTONI, M.; ROSSEN, J.; MARTIRENA, F.; SCRIVENER, K.. Cement substitution by a combination of metakaolin and limestone, *Cement and Concrete Research*, 42 (12), 1579-1589. 2012.

ASTM C 1138, Standard test method for abrasion resistance of concrete (underwater method), in: *Annual Book of ASTM Standards*, vol. 04.02, ASTM, West Conshohocken, 2019.

ASTM C627-10, Standard Test Method for Evaluating Ceramic Floor Tile Installation Systems Using the Robinson-Type Floor Tester, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2010, www.astm.org.

ASTM C944/C944M, Standard Test Method for Abrasion Resistance of Concrete or Mortar Surfaces, by the Rotating-Cutter Method, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2005, www.astm.org.

ATIŞ, C. D. High volume fly ash abrasion resistant concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering*. v. 14, n. 3, p. 274-277, 2002.

ATRUSHI, D. S. Tensile and Compressive Creep of Early Age Concrete: Testing and Modelling. The Norwegian University of Science and Technology, 2003.

BARBOSA, E. P. Estudo da produção e caracterização de metacaulinita para utilização como material cimentício suplementar. 2019. 101 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Amazonas, Manaus. 2019.

BELLETTI, B.; CERIONI, R.; MEDA, A.; PLIZZARI G. Design Aspects on Steel Fiber-Reinforced Concrete Pavements. *J Mater Civ Eng* 2008;20:599–607. 2008.

BENTUR, A.; MINDESS, S.. *Fibre Reinforced Cementitious Composites*, 1990.

BENTUR, A.; MITCHELL, D.. Material performance lessons. Original Research Article. *Cement and Concrete Research*, Volume 38, Issue 2, February, pp. 259-272. 2008.

BRANDÃO, A. M. S. Qualidade e durabilidade das estruturas de concreto armado. 1998. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.

BRITISH STANDARDS - EN 14651. Test method for metallic fibre concrete - Measuring the flexural tensile strength (limit of proportionality (LOP), residual). vol. 3. 2007.

BRUSTEIN, F. A.. Estudo da aderência entre concreto e argamassas industriais e compósitos cimentícios reforçados com fibras: avaliação em diferentes idades e do uso de ponte de aderência. Rio de Janeiro. 2020

CABRERA, J. G.; LYNSDALE, C. J. The effect of superplasticisers on the hydration of normal Portland cement. L'Industria Italiana del Cimento, v. 7-8, p. 532-541, 1996.

CAJKA, R.; MARCALIKOVA, Z.; KOZIELOVA, M.; MATECKOVA, P.; SUCHARDA, O.. Experiments on fiber concrete foundation slabs in interaction with the subsoil. Sustainability 12 (9), 3939. 2020.

CARLESSO, D. M.; DE LA FUENTE, A.; CAVALERO, S. H. P.. Fatigue of cracked high performance fiber reinforced concrete subjected to bending. Constr Build Mater 2019;220:444–55.

CHAGAS, L. F. S. de A.. Concepção e processamento de material compósito para otimização de performance tribológica: abrasão e erosão. 2017. Belo Horizonte – Minas Gerais.

CHENG, T.; CHENG, A.; HUANG, R.; LIN, W.. Abrasion Properties of Steel Fiber Reinforced Silica Fume Concrete According to Los Angeles and Water Abrasion Tests. Taiwan. 2014.

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, pp. 1087-1092, 2004.

CHODOUNSKY, M. A.; VIECILI, F. A. Pisos Industriais de Concreto - Aspectos Teóricos e Executivos. São Paulo: Reggenza, 2007.

COLEMAN, N. J.; PAGE, C. L. Aspects of the pore solution chemistry of hydrated cement pastes containing MK: lime hydration. *Cement and Concrete Research*, Oxford, v. 27, n. 1, p. 147-154, 1997.

CUNHA-DUNCAN, F. N.; BRADT, R. C. *Fratura de refratários*. Cerâmica, 2003.

ÇAVDAR, A.; YETGIN, Ş. Investigation of abrasion resistance of cement mortar with different pozzolanic compositions and subjected to sulfated medium. *Construction and Building Materials*. v. 24, n. 4, p. 461-470, april 2010.

DA SILVA, C. V.. *Contribuição ao estudo do desgaste superficial por abrasão em concretos empregados em pisos*. 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

DAN'KIN, A. A. Resistance of some refractory compounds and hard alloys to wear induced by a high-speed abrasive-laden air stream. *Poroshkovaya Metallurgiya*, 1970.

DAWOOD, E.; RAMLI, M. Mechanical properties of high strength flowing concrete with hybrid fibers, *Construction and Building Materials*, 28 (2011), n. 1, pp. 193– 200.

DE SOUZA, Felipe Rodrigues. *Concreto reforçado com fibras de PVA aplicado a pavimentos aeroportuários: propriedades mecânicas e dimensionamento*. 2021. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

DIAS, L. L.; QUINTEIRO, E.; BOSCHI, A. O.. Efecto de la presencia de cristales sobre la resistencia al desgaste de vidrados. In: *Qualicer, Castellón (Espanha), Proceedings VI Congresso Mundial de la Calidad del Azulejo y del Pavimento Carámico*, 2000.

DO CARMO, J. B.; PORTELLA, K. F.. Estudo comparativo do desempenho mecânico da sílica ativa e do metacaulinita como adições químicas minerais em estruturas de concreto. *Associação Brasileira de Cerâmica - SciELO Brasil, Cerâmica* 54, 309-318. 2008.

THAKRE, A. B.; HARSHA, S. P.; NARASIMHAN, R.. Erosion behaviour of fibre-reinforced polymer composites: A review. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, Volume 36, Issue 8. 2017.

Federal Aviation Administration. Airport Pavement Design and Evaluation. Aviation 2009;1:1–2.

FEIJÃO, J. F. M.; ALARCON, O. E.; MELLO, J. D. B.; ROSA, F. G.; SILVEIRA, R.; SILVEIRA, M. Estudo do mecanismo de abrasão de pavimentos cerâmicos utilizando a técnica esclerométrica. *Cerâmica*. v. 42, n. 275, p. 205-208, maio/jun. 1996.

FELEKOG˘LU, B.; TOSUN-FELEKOG˘LU, K.; KESKINATES, M.; GÖDEK, E.. A comparative study on the compatibility of PVA and HTPP fibers with various cementitious matrices under flexural loads, *Constr. Build. Mater.* 121 (2016) 423–428.

FERREIRA, B. et al. Tensile strain hardening of a metakaolin based fibre reinforced composite. 7th Internacional Conference on Safety and Durability of Structures. Portugal. May 10 – 12, 2016.

FONSECA, N. M. S. Betões estruturais com a incorporação de agregados grossos reciclados de betão: influência das condições de cura no desempenho mecânico. 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa.

FRIAS, M.; CABRERA, J. Pore size distribution and degree of hydration of metakaolin-cement pastes. *Cement and Concrete Research*, Oxford, v. 30, p. 561-569, 2000.

GARCÍA, A.; FRESNO, D. C.; POLANCO, J. A.. Effect of dry-shaking treatment on concrete pavement properties. *Construction and Building Materials*. v. 22, n. 11, p. 2202-2211, nov. 2008.

GÖDEK, E.; TOSUN-FELEKOG˘LU, K.; KESKINATES, M.; FELEKOG˘LU, B.. Development of flaw tolerant fiber reinforced cementitious composites with calcined kaolin, *Appl. Clay Sci.* 146 (2017) 423–431.

HAN J. P., TAO J. Y.. Experimental study on flexural performance of PVA fiber reinforced cement-based composites. *Appl Mech Mater* 2013;357–360:963– 7. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.357-360.963>.

HORSZCAZRUK, E. K., Hydro-Abrasive Erosion of High Performance Fiber-Reinforced Concrete, *Wear*, Vol. 267, 2009, p. 110–115, <https://doi.org/10.1016/j.Wear.2008.11.010>.

HUANG B. T.; ZHU, J. X., WENG, K. F.; LI, V. C.; DAI, J. G.. Ultra-high-strength engineered/strain-hardening cementitious composites (ECC/SHCC): Material design and effect of fiber hybridization, *Cem. Concr. Compos.* 129 (2022) 104464.

HUTCHINGS, I. M. *Tribology: Friction and wear of engineering Materials*. Cambridge: Butterworth Heinemann, 1992.

IBÁÑEZ, M. J. G. Estudio de las propiedades mecánicas y superficiales de recubrimientos vidrados de piezas cerâmicas: Puesta a punto de nuevas técnicas de medida. 1998. 243p. Tese (Doutorado em Engenharia) – Escuela Superior de Tecnología y Ciencias Experimentales. Departamento de Ingeniería Química da Universitat Jaume I, Castellón, Espanha.

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

JIANMING, Y.; LUMING, W.; JIE, Z. Experimental study on the deformation characteristics of magnesium potassium phosphate cement paste at early hydration ages. *Cement and Concrete Composites*, v. 103, p. 175-182, 2019.

KAMAL A.; KUNIEDA M.; UEDA N.; NAKAMURA H.. Evaluation of crack opening performance of a repair material with strain hardening behavior, *Cem. Concr. Compos.* 30 (10) (2008) 863–871.

KHOSHNOUD, P.; ABU-ZAHRA, N.. The effect of particle size of fly ash (FA) on the interfacial interaction and performance of PVC/FA composites.

KORMANN, A. C. M. Estudo do desempenho de quatro tipos de materiais para reparo a serem utilizados em superfícies erodidas de concreto de barragens. Dissertação de mestrado. Curitiba, 2002.

KRAUSE, O.; URBANEK, G.; KORBER, H. Determining resistance to abrasion at ambiente temperature – improving comparability between laboratories. RHI Bulletin, v. 2, p. 44-49, 2013.

LEPECH, M.; LI, V. C.. WATER PERMEABILITY OF CRACKED CEMENTITIOUS COMPOSITES. Advanced Civil Engineering Materials Research Laboratory Department of Civil and Environmental Engineering University of Michigan, Ann Arbor, Michigan 48109-2125, USA. 2005.

LI, H.; ZHANG, MAO-HUA; OU, JIN-PING. Abrasion resistance of concrete containing nanoparticles for pavement. Wear. v. 260, n. 11-12, p. 1262-1266, jun. 2006.

LI, V.C.. Engineered cementitious composites – tailored composites through micromechanical modeling, J. Adv. Concr. Technol. 1(3). doi: <https://doi.org/10.3151/jact.1.215>. 1998.

LI, V. C.. On engineered cementitious composites (ECC): a review of the material and its applications, Asian J. Appl. Sci. 4 (5) (2004) 215–230. 2011.

LI, V. C.. Engineered Cementitious Composites (ECC) – Bendable Concrete for Sustainable and Resilient Infrastructure. University of California at Berkeley, Berkeley, CA, USA. 2019.

LI, V. C.. From Micromechanics to structural engineering - The design of cementitious composites for civil engineering applications. JSCE Journal of Structural Mechanics, Earthquake and Engineering, vol. 10, n. 2, pp. 37-48. 1993. Recuperado de <http://hdl.handle.net/2027.42/84735>

LI, S.. Durability and bond of high-performance concrete and repaired Portland cement concrete. University of Connecticut ProQuest Dissertations Publishing, 1997.

LI V., WU H.C., MAALEJ M., MISHRA D.K., HASHIDA T. Tensile Behavior of Engineered Cementitious Composites with Discontinuous Random Steel Fibers. 1984.

LIM, T. Y.; LEE, S. L.. Bending Behavior of Steel-Fiber Concrete Beams. ACI Struct J n.d.;84. <https://doi.org/10.14359/2794>. 1987.

LIMA, E. O. Durabilidade do concreto armado em indústrias siderúrgicas: contribuição à identificação e mapeamento dos agentes agressivos. 2000. 145 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória.

LIU, T. C. Abrasion resistance of concrete. ACI Journal - Proceedings. v. 78, n. 5, p. 341-350, sep-oct, 1981

LÖFGRAN I. Fibre-reinforced Concrete for Industrial Construction - a fracture mechanics approach to material testing and structural analysis. 2005.

MAGALHÃES, M. S. Caracterização experimental de compósitos cimentícios reforçados com fibras de PVA: processo de fratura, propriedades térmicas, deformações diferidas e estabilidade térmica. p. 15. 2010.

MAGALHÃES, M. S., TOLEDO FILHO, R. D., FAIRBAIRN, E. M. R. Influence of local raw materials on the mechanical behavior and fracture process of PVA-SHCC. Mater Res, v.17, 2014, p.146 - 156.

MEHTA, P.K.; MONTEIRO, P.J.M. Concreto, estrutura, propriedades e materiais. São Paulo: PINI, 2014.

METACAULIM do Brasil (2022). Sustentabilidade. Metacaulim HP e HP ULTRA: contribuindo para sustentabilidade. Disponível em: . Acessado em junho de 2022. MOHAMED, K. I.; ASSEM, A. A. H.; MOHAMED, L.. Effect of Fiber Type on Impact and Abrasion Resistance of Engineered Cementitious Composite. 2018.

MOHAMED, K. I.; ASSEM, A. A. H.; MOHAMED, L.. Abrasion Resistance of Self-Consolidating Engineered Cementitious Composites Developed with Different Mixture Compositions. 2019.

MOREIRA, J.; VOLLMANN, K.; BORTOLATTO, L.; MULLER, L.; RIELLA, H. G.; KUHNNEN, N. C.. Síntese da zeólita 5a obtida por troca iônica a partir de resíduo da indústria de papel. XX Congresso Brasileiro de Engenharia Química (COBEQ). 2014.

NAAMAN, A. E.; BUSCHOW, K. H. J.; ROBERT, W. C.; MERTON, C. F.; BERNARD, I.; EDWARD, J. K.; et al. Reinforced concrete. Encyclopedia of materials: science and technology. Oxford: Elsevier; 2001. p. 8095–109.

NAIK, T. R.; SINGH S. S.; RAMME B. W. Effect of source of fly ash abrasion resistance of concrete. Journal of Materials in Civil Engineering. n. 14, p. 417-426, 2002.

NAIK, T. R., SINGH, S. S., HOSSAIN, M. M. Abrasion resistance of high strength concrete made with class C fly ash. ACI Materials Journal. v. 92, n. 66, p. 649-659, 1995.

NEVILLE, A. M. Propriedades do concreto. 2. ed., São Paulo: Pini, 2015.

ÖSBAY, E.; KARAHAN O.; LACHEMI, M.; HOSSAIN K.M.A.; ATIS, C.D.. Investigation of properties of engineered cementitious composites incorporating high volumes of fly ash and metakaolin, ACI Mater. J. 109 (2012) 565–571.

PERDIKARIS, P. C.; ROMEO, A.. Size effect on fracture energy of concrete and stability issues in three-point bending fracture toughness testing. ACI Material Journal 92(5), 483–496 (1995)

RANADE, R.. Advanced Cementitious Composite Development for Resilient and Sustainable Infrastructure, University of Michigan, 2014. Ph.D. Thesis.

RANADE, R.; LI, V. C.; STULTS, M. D.; HEARD, W. F.; RUSHING, T. S.. Composite properties of high-strength, high-ductility concrete, ACI Mater. J. 110 (4) (2013) 413–422.

ROCHER, W. T. M. Identificação dos agentes agressivos e das patologias em pisos industriais de frigoríficos de suínos. 2007. 204 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

RODRIGUES, P. P. F.; MONTARDO, J. P. A Influência da adição de fibras de polipropileno nas propriedades dos concretos para pisos e pavimentos. In: REIBRACIBRACON, 44, Belo Horizonte/MG, 2002.

ROPKE, J. C. Concrete Problems: causes and cures. New York: McGraw-Hill, 1982.

SABIR, B.B., WILD, D.E., BAI, J. Metakaolin and calcined clays as pozzolans for concrete: a review. *Cemente & Concrete Composites*, London UK, v23, 441- 454p. 2001.

SADRINEJAD, I. et al., The mechanical and durability properties of concrete containing hybrid synthetic fibers, *Construction and Building Materials*, v. 178, p. 72–82, may. 2018.

SALLAL, R.; ABID, A. N. H.; YASIR, H. D.. Experimental tests on the underwater abrasion of Engineered Cementitious Composites. Iraq. 2018.

SALLAL, R.; ABID, A. N. H.; MOHAMED, S. S.; NOOR, S. M.; YASIR, H. D.. Hydro-abrasive resistance of engineered cementitious composites with PP and PVA fibers. Iraq. 2018.

SANTANA, L. G. L.; MAGALHÃES, M. S.. Influência do teor da metacaulinita em compósitos cimentícios reforçados com fibra. 4º Congresso Luso-Brasileiro de Materiais de Construção Sustentáveis. Salvador, Brasil. p. 1149-1161. 2022.

SANTOS, S. F.. Evaluation of the energy of fracture in ceramic materials at high temperatures.. 2005. 226 f. Tese (Doutorado em Ciências Exatas e da Terra) - Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2005.

SANTOS, V. A. A.; VALENZUELA, A. O.; GALLO, J. B.; PANDOLFELLI, V.C. Fundamentos e testes preliminares de resistência a erosão em concretos refratários. *Cerâmica*, 2006.

SANTOS, V. A. A.; PRESTES, E.; MEDEIROS, J.; VEIGA, J. L. B.; PANDOLFELLI, V. C. Resistência à erosão de concretos refratários de alta alumina nanoligados. *Cerâmica*, 2011.

SCHACKELFORD, J. F. Introduction to materials science for engineers. 5 ed. Upper Saddle River, New Jersey: Prentice Hall, 1999.

SEBÖK, T.; STRÁNĚL, O. Wear resistance of polymer-impregnated mortars and concrete. *Cement and Concrete Research*. v. 34, n. 10, p. 1853-1858, oct. 2004.

SHENG, C., & ZHANG, Y. Influence of combustion conditions on the composition and microstructure of fly ash from co-combustion of coal and petroleum coke. 2005.

SIDDIQUE, R. Effect of fine aggregate replacement with Class F fly ash on the abrasion resistance of concrete. *Cement and Concrete Research*. v. 33, n. 11, p. 1877-1881, jun. 2003.

SIDDIQUE, R.; PRINCE, W.; KAMALI, S. Influence of utilization of high-volumes of class F fly ash on the abrasion resistance of concrete. *Journal of Practices and Technologies*. n. 10, p. 13-28, jan-jun. 2007.

SOROUSHIAN, P.; NAGI, M.; HSU, J., 1992, "Optimization of the Use of Lightweight Aggregates in Carbon Fiber Reinforced Cement," *ACI Materials Journal*, V. 89, No. 3, May-June, pp. 267-276.

SOVJÁL, R.; MÁCA, P.; IMLAUF T.. Effect of fibre aspect ratio and fibre volume fraction on the effective fracture energy of ultra-high-performance fibrereinforced concrete. *Acta Polytech* 2016;56:319–27. <https://doi.org/10.14311/AP.2016.56.0319>.

STACK, A.; MANCIO, M.; MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J .M. Low-cost and Sustainable Self-consolidating Concrete with Fly Ash and Limestone Powder. *ACI Materials Journal*. Submetido e aceito para publicação. 2011.

SUTHIWARAPIRAK, P., MATSUMOTO, T., KANDA, T.. Flexural Fatigue Failure Characteristics of an Engineered Cementitious Composite and Polymer Cement Mortars, In: proceedings of JSCE, nº 718, pp. 121-134. 2002.

TARR, S. M.; FARNY, J. A. *Concrete Floors on Ground*. 4 ed. Portland Cement Association, Skokie, Illinois, U.S.A., 2008.

VASSOU, V. C.; SHORT, N. R.; KETTLE, R. J.. Microstructural Investigations into the Abrasion Resistance of Fiber-Reinforced Concrete Floors. *J. Mater. Civ. Eng.*, Vol. 20, No. 2, 2008, pp. 157–168, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0899-1561\(2008\)20:2\(157\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(2008)20:2(157)).

VIECILI, F. A. Influência da utilização dos endurecedores superficiais cimentícios na resistência à abrasão de pisos industriais de concreto. 2004. 99 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Curso de Mestrado Profissionalizante, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

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.. Polyvinyl alcohol fiber reinforced engineered cementitious composites: Material design and performances, Proc Intl Workshop on Hpfrc Structural Applications. 2011.

WARUDKAR, A.; ELAVENIL, S. A comprehensive review on abrasion resistance of concrete Int. J. Appl. Sci. Eng. 2020.

WONG, H. S.; RAZAK, H. A. Efficiency of calcined kaolin and silica fume as cement replacement material for strength performance. Cement and Concrete Research, Oxford, v. 35, p. 696-702, 2005.

YANG, J.Z.; FANG, M.H.; HUANG, Z.H.; HU, X.Z.; LIU, Y.G.; SUN, H.R.; HUANG, J.T.; LI, X.C. Solid particle impact erosion of alumina-based refractories at elevated temperatures. Journal of the European Ceramic Society, 2012.

YANG, E.; YANG, Y.; LI, V. C.. Use of High Volumes of Fly Ash to Improve ECC Mechanical Properties and Material Greenness. 2007.

YAZICI, Ş.; İNAN, G. An investigation on the wear resistance of high strength concretes. Wear. v. 260, n. 6, p. 615-618, mar. 2006.

YU K. Q.; YU, J. T.; DAI, J. G; LU, Z. D.; SHAH, S. P.. Development of ultra-high performance engineered cementitious composites using polyethylene (PE) fibers, Constr. Build. Mater. 158 (2018) 217–227.

YU J.; WU H.; LEUNG C. K.Y. Feasibility of using ultrahigh-volume limestone-calcined clay blend to develop sustainable medium-strength Engineered Cementitious Composites (ECC). J. of Cleaner Production, 262 (2020), 121343.

ZHANG, J.; STANG, H.; LI, V. C.. Fatigue life prediction of fiber reinforced concrete under flexural load. *Int J Fatigue* 1999;21:1033–49. [https://doi.org/10.1016/S0142-1123\(99\)00093-6](https://doi.org/10.1016/S0142-1123(99)00093-6). 1999.

ZHENG, Y.; ZHANG, L.F.; XIA, L.P.. Investigation of the behaviour of flexible and ductile ECC link slab reinforced with FRP, *Constr. Build. Mater.* 166 (2018). 694–711.

ZHU, J.X.; XU, L.Y.; HUANG, B.T.; WENG, K.F.; DAI, J.G.. Recent developments in Engineered/Straining-Hardening Cementitious Composites (ECC/SHCC) with high and ultra-high strength. China. 2022.

WANG J.F.; LI G.Q.. Testing of semi-rigid steel-concrete composite frames subjected to vertical loads. *Engineering Structures*, 29(8), pp. 1903-1916. (15) (PDF) Plastic Hinge Analysis of Composite Frames under Column Loss Scenario. 2007.

WEI, S.; SAMIR, S. J. A. M.. Study of the Interface Strength in Steel Fiber Reinforced Cement-based Composites. *ACI J Proc* n.d.;83. <https://doi.org/10.14359/10453>. 1986.

ZUM GAHR, K.H.. Microstructure and wear of materials, *Tribology Series*, Vol. 10, Elsevier, Amsterdam. 1987.