

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE FEIRA DE SANTANA
DEPARTAMENTO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL E
AMBIENTAL**

KALINE GUERRA CALAZANS

**EFEITO DE CINZA DE CASCA DE ARROZ NO COMPORTAMENTO
MECÂNICO DE COMPÓSITOS CIMENTÍCIOS REFORÇADOS COM
FIBRAS DE SISAL SUBMETIDOS A ATAQUE QUÍMICO**

**FEIRA DE SANTANA, BA - BRASIL
DEZEMBRO/2021**

KALINE GUERRA CALAZANS

EFEITO DE CINZA DE CASCA DE ARROZ NO COMPORTAMENTO
MECÂNICO DE COMPÓSITOS CIMENTÍCIOS REFORÇADOS COM
FIBRAS DE SISAL SUBMETIDOS A ATAQUE QUÍMICO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil e Ambiental, da Universidade Estadual de Feira de Santana, como parte dos requisitos necessários para obtenção do grau de Mestre em Ciências em Engenharia Civil e Ambiental.

Área de concentração: Materiais de Construção e Estruturas.

Orientador:

Prof. Dr. Paulo Roberto Lopes Lima

Coorientador:

Prof. Dr. Romildo Dias Toledo Filho

FEIRA DE SANTANA, BA – BRASIL

DEZEMBRO/2021

Ficha catalográfica - Biblioteca Central Julieta Carteado - UEFS

C147 Calazans, Kaline Guerra

Efeito de cinza de casca de arroz no comportamento mecânico de compósitos cimentícios reforçados com fibras de sisal submetidos a ataque químico / Kaline Guerra Calazans. – 2021.

95 f.: il.

Orientador: Paulo Roberto Lopes Lima.

Coorientador: Romildo Dias Toledo Filho.

Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual de Feira de Santana, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil e Ambiental, Feira de Santana, 2021.

Construção civil – cimento - substituição. 2. Construção civil - cinzas da casca do arroz. 3. Metacaulinita - sisal. 4. Sustentabilidade. I. Título. II. Lima, Paulo Roberto Lopes, orient. III. Toledo Filho, Romildo Dias, coorient. IV. Universidade Estadual de Feira de Santana.

CDU: 691.53:633.626.23

Renata Aline Souza Silva - Bibliotecária - CRB-5/1702

EFEITO DE CINZA DE CASCA DE ARROZ NO COMPORTAMENTO
MECÂNICO DE COMPÓSITOS CIMENTÍCIOS REFORÇADOS COM
FIBRAS DE SISAL SUBMETIDOS A ATAQUE QUÍMICO

Kaline Guerra Calazans

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO PROGRAMA DE PÓS
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL DA UNIVERSIDADE
ESTADUAL DE FEIRA DE SANTANA COMO PARTE DOS REQUISITOS
NECESSÁRIOS PARA OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS EM
ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL.

Feira de Santana, 03 de dezembro de 2021.

Aprovado por:

Prof. Dr. Paulo Roberto Lopes Lima
(Universidade Estadual de Feira de Santana)

Prof. Dr. Romildo Dias Toledo Filho
(Universidade Estadual de Feira de Santana)

Prof. Dra. Cintia Maria Ariani Fontes
(Universidade Estadual de Feira de Santana)

Prof. Dr. Normando Perazzo Barbosa
(Universidade Federal da Paraíba)

FEIRA DE SANTANA, BA – BRASIL

DEZEMBRO/2021

“É preciso força pra sonhar e perceber que a estrada vai além do que se vê”. (Los Hermanos)

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente ao meu pai Oxalá, à minha grande mãe Oxum e a todos os meus guias que me guardam e abrem os meus caminhos. Com eles, aprendi que há o nosso tempo e o tempo certo, tempo este que me permitiu confiar que daria tudo certo.

O mestrado foi um grande desafio desde a idealização até a realização. Foram muitas provações que partiram desde a mudança para duas cidades, Feira de Santana e Rio de Janeiro, à vivência de uma pandemia. No entanto, o desejo de tornar esse sonho realidade superou qualquer percalço e não teria sido possível sem as tantas pessoas importantes presentes em minha vida.

Aos meus pais, Paulo Cezar Calazans e Jackeline Calazans, eu agradeço e agradecerei sempre por toda abdicação e mesmo assim nunca será o suficiente. Obrigada por nunca medirem esforços para tornar vossos os meus sonhos. Obrigada pelo amor incondicional, amparo e pelos valores que me foram ensinados com zelo, renúncias e sacrifícios. Ao meu irmão Paulo pela inspiração e exemplo de determinação e por todo o suporte e empatia que teve por mim desde o início deste processo. Obrigada a vocês que nunca hesitaram em me ajudar a tornar possível as condições para que eu pudesse realizar este sonho de partir para outra cidade e concluir o mestrado. À minha tia e segunda mãe Kel, obrigada por dar tudo de si para se fazer presente em todos os momentos de minha vida. A sua dedicação e apoio foram indispensáveis para me manter firme nessa caminhada.

Aos professores Paulo Roberto Lopes Lima e Romildo Dias Toledo Filho, o meu muito obrigada pela honra de tê-los como orientadores nos quais me inspiro e pelos exemplos de competência e profissionalismo. Ao Professor Paulo serei especialmente grata por sua simplicidade e acolhimento de sempre, e principalmente por confiar no meu potencial ao me propor concluir o mestrado na COPPE. Ao professor Romildo, profissional de grande referência no meu tema, agradeço imensamente pela oportunidade e privilégio de poder vivenciar a troca de experiências profissionais. À professora Cintia Fontes, que será em meu coração para sempre minha orientadora, obrigada pelo amparo quando eu mais precisei. Além de profissional exemplar, você é humana! Nunca me esquecerei de suas doces palavras de carinho e pela relação linda que construímos.

A minha trajetória de mestrado não iniciou no processo seletivo e por isso não poderia esquecer das pessoas que tornaram possível o meu ingresso. Gratidão ao

professor Marcílio Vilasboas pelo incentivo incansável e amparo quando nem eu acreditava que seria possível, e à Thaís que com sua generosidade me abriu portas essenciais para trilhar esse caminho e esteve sempre presente.

À todos os amigos e colegas que foram entrando na minha vida durante esse processo, quero dizer que cada um tem um espaço especial no meu coração, a começar por Alana e Laís. Muito obrigada por formarem nosso tripé, pois mesmo quando uma de nós fraquejávamos, não faltava amor e cumplicidade para nos mantermos firmes nesse objetivo.

Aos meus amigos de PPGECEA e Feira, obrigada pelos risos e experiências que tornaram tão leve nossa rotina: Paulo Henrique, John, Santiago, Clara, Ulisses, Diego, Dagoberto, Yasmin, Tamires e Luan. Aos colegas que fiz no NUMATS, obrigada por me acolheram de braços abertos, vocês são incríveis: Yas, Dani, Juliano, Nina e Thaís.

Como prometido, esta pessoa merece um grande destaque: Yassin. Começou como colega, se tornou um amigo, algumas vezes psicólogo e muitas vezes professor. Sinto um respeito, admiração e gratidão que não conseguirei jamais traduzir em palavras. Obrigada por todas as palavras de incentivo e por ter estado literalmente ao meu lado nos momentos mais desafiadores dessa trajetória. Eu nem sei como agradecer sua disponibilidade e atenção. Você é uma das pessoas mais generosas que eu conheci em minha vida e serei para sempre grata pelo que fez por mim.

Aos professores José Mário, Socorro e Mônica agradeço pelo conhecimento compartilhado tão relevante para a minha jornada acadêmica. Aos funcionários do PPGECEA e NUMATS, Mari, Ioná, Luzidelle, Antonio Carlos, Flávio, Márcio, Carlos, Marcelo e Mauro, agradeço pela participação essencial e ativa neste processo.

Aos amigos que fiz no Rio de Janeiro, cidade que se tornou minha casa, obrigada por fazerem dessa aventura acadêmica uma experiência tão feliz e serem minha família carioca: Léo, Gui, Priscilla, Camila, Thiago, Léo Martingo, Sandro, Lili e especialmente Léo Veiga que escancarou as portas de sua casa como uma grande prova de amizade.

Por fim, à FAPESB pelo apoio financeiro.

Resumo da Dissertação apresentada ao PPGECEA/UEFS como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

EFEITO DE CINZA DE CASCA DE ARROZ NO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE COMPÓSITOS CIMENTÍCIOS REFORÇADOS COM FIBRAS DE SISAL SUBMETIDOS A ATAQUE QUÍMICO

Kaline Guerra Calazans

Dez, 2021

Orientador: Prof. Dr. Paulo Roberto Lopes Lima

Coorientador: Prof. Dr. Romildo Dias Toledo Filho

Programa: Engenharia Civil e Ambiental

O setor da construção civil é responsável por causar grandes impactos ambientais em função da elevada emissão de carbono gerados em seus processos produtivos, altas taxas de desperdício e exploração de recursos naturais não-renováveis. O uso de fibras vegetais e reutilização de cinzas industriais com potencial pozolânico, como a cinza da casca de arroz, são alternativas capazes de reduzir esses impactos e aumentar o desempenho ecológico de materiais cimentícios. O objetivo deste trabalho foi estudar a influência da substituição da metacaulinita (adição pozolânica comumente utilizada em compósitos reforçados com fibras vegetais) por cinza de casca de arroz, avaliar o efeito da variação do teor de substituição do cimento por cinza de casca de arroz para duas frações volumétricas de fibras de sisal. Para este trabalho foram confeccionados compósitos com teores de substituição do cimento Portland por metacaulinita em 30% e por cinza de casca de arroz em 30% e 50% em teores de fibras de 4% e 6%, em massa de aglomerante. O desempenho foi avaliado através de ensaios físicos e mecânicos antes e após imersão em solução concentrada de ácido sulfúrico e sulfato de sódio com intuito de simular ambiente agressivo acelerado. Os resultados obtidos mostraram que o traço contendo metacaulinita apresentou melhores índices físicos, no entanto, o traço contendo 30% do teor de cinza de casca de arroz e volume de fibras igual 6% apresentou melhor comportamento pós fissuração em função da maior capacidade de controle de propagação de fissuras e tenacidade pós ataques.

Abstract of Dissertation presented to PPGECEA/UEFS as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

RICE HUSK ASH EFFECT ON THE MECHANICAL BEHAVIOR OF CEMENTITIOUS COMPOSITES REINFORCED WITH SISAL FIBERS SUBJECTED TO CHEMICAL ATTACK

Kaline Guerra Calazans

Dec, 2021

Advisor: Prof. Dr. Paulo Roberto Lopes Lima

Co-supervisor: Prof. Dr. Romildo Dias Toledo Filho

Department: Civil and Environmental Engineering

The construction sector is responsible for causing major environmental impacts due to the high carbon emissions generated in its production processes, high rates of waste and exploitation of non-renewable natural resources. The use of vegetable fibers and reuse of industrial ash with pozzolanic potential, such as rice husk ash, are alternatives capable of reducing these impacts and increasing the ecological performance of cementitious materials. The objective of this work was to study the influence of the substitution of metakaolinite (pozzolanic addition commonly used in vegetal fiber reinforced composites) by rice husk ash, to evaluate the effect of the variation of the substitution content of cement by rice husk ash for two volume fractions of sisal fibers. For this work, composites were made with replacement levels of Portland cement by metakaolinite at 30% and by rice husk ash at 30% and 50% in fiber contents of 4% and 6%, by binder mass. The performance was evaluated through physical and mechanical tests before and after immersion in concentrated solution of sulfuric acid and sodium sulfate in order to simulate an aggressive accelerated environment. The results obtained showed that the mixture containing metakaolinite presented better physical indexes, however, the mixture containing 30% of rice husk ash content and fiber volume equal to 6% presented better post-cracking behavior due to the higher capacity of crack propagation control and post-attack toughness.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	15
1.1 OBJETIVOS	19
1.2 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	19
2. CADEIA PRODUTIVA DA CINZA DE CASCA DE ARROZ	21
3. PROPRIEDADES DE COMPÓSITOS COM FIBRAS CURTAS DE SISAL	22
3.1 DURABILIDADE DAS FIBRAS DE SISAL EM MATRIZES CIMENTÍCIAS	25
3.2 USO DE ADIÇÕES POZOLÂNICAS EM COMPÓSITOS REFORÇADOS COM FIBRA DE SISAL	28
3.2.1 Metacaulinita	29
3.2.2 Cinza de casca de arroz	30
4. DURABILIDADE DE ELEMENTOS CONSTRUTIVOS	30
4.1 DESEMPENHO, DURABILIDADE E VIDA ÚTIL	30
4.2 DURABILIDADE E AGRESSIVIDADE AMBIENTAL	33
4.2.1 Ataque ácido	35
4.2.2 Ataque por sulfatos	39
5. MATERIAIS E MÉTODOS	41
5.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS	42
5.1.1 Fibras de sisal	42
5.1.1.1 Tratamento químico das fibras de sisal	43
5.1.1.2 Teor de umidade da fibra de sisal	43
5.1.2 Aglomerantes	44
5.1.2.1 Composição química	44
5.1.2.2 Granulometria	45
5.1.2.3 Massa específica	46
5.1.3 Areia	47
5.1.3.1 Granulometria	47
5.1.4 Água	47
5.1.5 Aditivos químicos	47
5.2 DOSAGEM E PRODUÇÃO DOS COMPÓSITOS	48
5.3 ANÁLISE TERMOGRAVIMÉTRICA DAS PASTAS (TG/DTG)	51
5.4 CARACTERIZAÇÃO DOS COMPÓSITOS	56
5.4.2 Absorção de água por capilaridade	56

5.4.3	Resistência à compressão uniaxial	57
5.4.4	Resistência à flexão em 4 pontos	58
5.4.5	Ataque de compósitos por ácido sulfúrico	60
5.4.6	Ataque de compósitos por sulfato de sódio	62
6.	RESULTADOS E DISCUSSÕES	62
6.1	ANÁLISE TERMOGRAVIMÉTRICA	62
6.2	PROPRIEDADES FÍSICAS DOS COMPÓSITOS	65
6.2.1	Absorção de água por imersão	65
6.2.2	Absorção de água por capilaridade	67
6.3	PROPRIEDADES MECÂNICAS DOS COMPÓSITOS	69
6.3.1	Resistência à compressão axial	69
6.3.2	Resistência à flexão em 4 pontos	72
6.3.3	Modo de ruptura dos compósitos sob esforços de flexão	75
6.4	ATAQUE POR SULFATO DE SÓDIO	78
6.5	ATAQUE POR ÁCIDO SULFÚRICO	81
7.	CONCLUSÕES	84
8.	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	86
9.	REFERÊNCIAS	87

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Emissões de CO ₂ entre compósitos com cimento Portland e compósitos com teores de substituição de 10%, 20% e 30% de metacaulim (Fonte: DUMANI E MAPIRAVANA, 2018)	18
Figura 2 Curvas típicas de tensão-deformação de compósitos reforçados com fibras de sisal com comprimento de 25mm (Fonte: LIMA, TOLEDO FILHO, MELO FILHO, 2014)	25
Figura 3 Morfologia da fibra de sisal: (a) fibra composta pelo conjunto de células individuais e (b) detalhe da célula individual (Fonte: SILVA et al., 2010)	27
Figura 4 Seção transversal da fibra de sisal. (a-b) sem o tratamento de hornificação; (c-d) após tratamento (Fonte: Ferreira <i>et al.</i> , 2012)	28
Figura 5 Evolução conceitual dos projetos de construções (Fonte: POSSAN E DEMOLINER (2013)	34
Figura 6 Degradação causada nas construções pelas variáveis atmosféricas (Fonte: SOUZA <i>et al.</i> , 2017)	35
Figura 7 Ação das variáveis atmosféricas no desempenho dos compósitos cimentícios (Fonte: Souza <i>et al.</i> , 2017)	35
Figura 8 Ataque químico por ácido sulfúrico em pilar de indústria de fertilizantes (Fonte: AGUIAR, 2006)	37
Figura 9 Processo de formação do ácido sulfúrico em tubulações de esgoto (Fonte: ROMANOVA <i>et al.</i> 2015)	39
Figura 10 Processo de desintegração do concreto por ataque por sulfatos (Fonte: EMMONS, 1993)	40
Figura 11 Fluxograma do programa experimental	43
Figura 12 Alinhamento e corte das fibras. a) pente de pregos; b) fibras de sisal cortadas com 40mm de comprimento	44
Figura 13 a) Lavagem alcalina das fibras de sisal; b) Secagem das fibras tratadas	44
Figura 14 Pesagem das fibras para ensaio de umidade	45
Figura 15 Curva granulométrica dos aglomerantes utilizados	47
Figura 16 Curva granulométrica da areia utilizada	48
Figura 17 Sequência das etapas do procedimento de mistura. a) mistura seca dos aglomerantes; b) adição da água previamente misturada com superplastificante; c)	

aspecto da pasta; d) retirada de material aderido à cuba; e) adição de areia; f) aspecto da argamassa; g) adição de fibras; h) aspecto final da mistura	51
Figura 18 Ensaio de espalhamento: a) 0,3MK4%, b) 0,3CCA4%, c) 0,3CCA6%, d)0,5CCA4%, e) 0,5CCA6%	52
Figura 19 Etapas da preparação das amostras de análise térmica, a) pesagem dos aglomerantes; b) moldagem das pastas; c) pasta sendo inserida dentro do saco plástico com o auxílio de espátula; d) amostras identificadas e vedadas com fita crepe; e) amostras no dessecador	53
Figura 20 Equipamento SDT Q600 TGA/DTA/DSC Simultâneo da TA Instruments.	54
Figura 21 Curvas típicas de termogravimetria e termogravimetria diferencial para	54
Figura 22 a) Secagem dos corpos de prova em estufa a 100°C; b) imersão em água de corpos de prova para saturação; c) pesagem do corpo de prova em balança hidrostática; d) pesagem dos corpos de prova na condição Msat	55
Figura 23 Corpo de prova selados em ensaio de absorção por capilaridade	57
Figura 24 Vibração mecânica dos corpos de prova cilíndricos	58
Figura 25 Posicionamento de LVDTs em ensaio de compressão axial	58
Figura 26 a) Moldagem de placa para ensaio de flexão em 4 pontos; b) Ensaio de resistência à flexão em 4 pontos; c) d) Esquema para execução de ensaio de flexão em 4 pontos	59
Figura 27 Sistema utilizado no registro do processo de fratura durante ensaio de flexão	60
Figura 28 Medição da abertura de fissuras a partir das linhas de referência no software <i>ImageJ</i>	61
Figura 29 Esquema dos pontos de aplicação de carga em ensaio de resistência à flexão em 3 pontos	62
Figura 30 Curvas TG e DTG das pastas	64
Figura 31 Evolução das curvas DTG aos 7 e 28 dias	66
Figura 32 Massa específica dos misturas aos 28 dias	68
Figura 33 Curvas de absorção por capilaridade	69
Figura 34 Curvas típicas tensão x deformação dos compósitos sob resistência à compressão axial: a) 7 dias; b) 28 dias; c) 56 dias	70
Figura 35 Curvas tensão x deformação dos compósitos aos 28 dias. a) 0,3MK4%; b) 0,3CCA4%; c) 0,3CCA6%; d) 0,5CCA4%; e) 0,5CCA6%	75

- Figura 36** Curvas típicas tensão x deformação dos compósitos com frações volumétricas distintas e das fibras com tratamento. 75
- Figura 37** Processo de fratura típico dos compósitos com 30% de metacaulinita e cinza de casca de arroz e volume de fibras iguais a 4% e 6% durante os ensaios de flexão 80
- Figura 38** Curvas típicas tensão x deformação dos compósitos sob resistência à flexão em 3 pontos após 28 dias de imersão em solução de sulfato de sódio 81
- Figura 39** Evolução da resistência à flexão em 3 pontos sob ataque por sulfato de sódio 82
- Figura 40** Curvas típicas tensão x deformação dos compósitos sob resistência à flexão em 3 pontos após 28 dias de imersão em solução de ácido sulfúrico 84
- Figura 41** Evolução da resistência à flexão em 3 pontos sob ataque por ácido sulfúrico 85

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 Composição química dos aglomerantes utilizados	46
Tabela 2 Massa específica dos aglomerantes utilizados	47
Tabela 3 Identificação das misturas	49
Tabela 4 Consumo de materiais para 1m ³ de compósito	50
Tabela 5 Percentuais de produtos hidratados da pasta de referência e da matriz calculados em base à massa calcinada do cimento	64
Tabela 6 Valores médios da absorção de água por imersão, índice de vazios e massa específica	66
Tabela 7 Resultados médios obtidos a partir do ensaio de absorção por capilaridade	69
Tabela 8 Resistência à compressão e módulo de elasticidade dos compósitos	70
Tabela 9 Deformação de pico e tenacidade dos compósitos aos 28 dias	71
Tabela 10 Resultados experimentais do ensaio de flexão dos compósitos	73
Tabela 11 Cálculo de densidade, espaçamento e abertura total de fissuras	77
Tabela 12 Resistência à flexão em 3 pontos e índice de tenacidade dos compósitos sob ataque por sulfato de sódio	81
Tabela 13 Resistência à flexão em 3 pontos e índice de tenacidade dos compósitos sob ataque por ácido sulfúrico	85

1.

1. INTRODUÇÃO

A evolução da tecnologia dos materiais direcionou os estudos para a obtenção de compósitos com desempenho cada vez melhor através do uso de adições minerais, otimizando propriedades fundamentais como porosidade e permeabilidade. No entanto, resistência e ductilidade também são parâmetros relevantes a serem considerados. Nesse contexto que surge a utilização de fibras como alternativa de reforço estrutural para substituir as armaduras de aço em estruturas mais esbeltas ou que demandam baixos esforços solicitantes.

O papel fundamental das fibras consiste no aumento da capacidade resistente da pasta de cimento, propiciado, por sua vez, pela ação conjunta entre o seu alto módulo de elasticidade e resistência mecânica em relação à matriz. Ao aliar aspectos ambientais às vantagens estruturais propiciadas pela utilização de fibras, como reforço estrutural, verifica-se o destaque das fibras vegetais sobre as manufaturadas, como é o caso das fibras de sisal (ISAIA, 2016; CORREIA, 2011).

Além de conferir uma alternativa tecnicamente efetiva, as fibras vegetais oferecem vantagens ambientais quando utilizadas como reforço em compósitos cimentícios em relação às fibras manufaturadas. As fibras vegetais são ecologicamente mais sustentáveis, têm caráter renovável e consomem menos energia no seu processo de beneficiamento. O ganho de resistência e tenacidade sob flexão após a fissuração da matriz também são vantagens que podem ser verificadas (FERREIRA *et al.* 2017)

Entretanto, os compósitos ainda assim apresentam algumas limitações quanto ao comportamento mecânico e de desempenho por estarem propensos a alterações devidas às suas interações com o meio. Esses mecanismos são capazes de comprometer a sua estabilidade e funcionalidade ao decorrer do tempo.

Materiais de construção que incorporam fibras vegetais são exemplos de utilização de materiais sustentáveis e já possuem estudos consolidados com resultados promissores acerca da sua fabricação (TOLEDO FILHO, 1997; LIMA, 2004; SILVA, 2009; MELO FILHO, 2005; SANTOS, 2014; FERREIRA, 2016). Para aumentar a sua durabilidade, várias pesquisas (LIMA E TOLEDO FILHO, 2008; FERREIRA, 2012; FIDELIS, 2014; SANTOS, 2020; DA GLORIA, 2021) tem verificado a possibilidade de utilização de adições minerais, como a metacaulinita, com o intuito de produzir uma matriz livre de hidróxido de cálcio e mitigar o efeito deletério provocado pela alcalinidade da matriz à fibra.

A utilização de adições minerais vem ganhando destaque nas últimas décadas, devido à crescente preocupação com o meio ambiente e à necessidade de tornar a cadeia produtiva sustentável. Deste modo, a utilização destes materiais suplementares tornou-se uma alternativa para viabilizar a utilização do reforço fibroso à matriz, e por consequência, agregar valor ambiental ao compósito. A grande vantagem ambiental está na diminuição do consumo de cimento que corresponde a um dos materiais com processo de fabricação mais poluentes do mundo em função dos elevados níveis de emissão de gás carbônico.

A indústria da construção civil é impactada pelo processo de queima verificado na produção do cimento Portland que chega a temperaturas de até 1450°C, o que faz com que a produção do cimento corresponda a uma faixa entre 88,6% a 92,2% das emissões de gases de efeito estufa do concreto e aproximadamente 7% das emissões no mundo (LIMA, 2010; SINDICATO..., 2019). Segundo Perlot, Rougeau e Dehaut (2013), para formar o clínquer, grandes volumes de dióxido de carbono são lançados na atmosfera através da descarbonatação da matéria-prima do cimento.

Dessa forma, além de reduzir a emissão de CO₂, a utilização de adições minerais pode diminuir os riscos de poluição devido à minimização do consumo de energia na produção do cimento, menor extração de recursos naturais não renováveis como calcário e argila, e diminuição de áreas de descarte desses resíduos (RIGON, 2015).

Dentre os resíduos industriais, as cinzas minerais destacaram-se na construção civil devido à sua composição química. Materiais como sílica ativa, cinza volante, metacaulinita e principalmente a cinza de casca de arroz destacam-se por apresentar consideráveis porcentagens de sílica e de outros óxidos e por isso podem ser utilizados em substituição parcial ao cimento Portland devido à sua atividade pozolânica (PAULA *et al.*, 2009).

Segundo Gursel, Maryman e Ostertag (2015), nos Estados Unidos a porcentagem de uso de cinzas volantes em produtos de cimento e concreto aumentou em função do aprimoramento das propriedades mecânicas e de durabilidade de misturas com cinzas volantes, além da redução nas emissões de gases de efeito estufa pela substituição do cimento Portland. No entanto, apesar do seu processo produtivo emitir menores teores de CO₂, a cinza volante é oriunda do processo de queima do carvão mineral, fonte de energia não renovável, diferentemente da casca de arroz.

Dumani e Mapiravana (2018) avaliaram a emissão de CO₂ de compósitos com teores de substituição de 10%, 20% e 30% de metacaulim (MK) e concluíram a partir dos resultados que a substituição parcial de cimento Portland (CP) por diferentes teores de MK pode reduzir as emissões de CO₂ do cimento. Os autores verificaram que as emissões de CO₂ dos compósitos com 100% de CP são maiores do que as das misturas contendo metacaulim, sendo 30% de metacaulim o teor ótimo de substituição. Portanto, substituir 100% de CP por misturas com MK representa uma grande oportunidade para melhorar o desempenho ambiental da indústria de cimento (Figura 1).

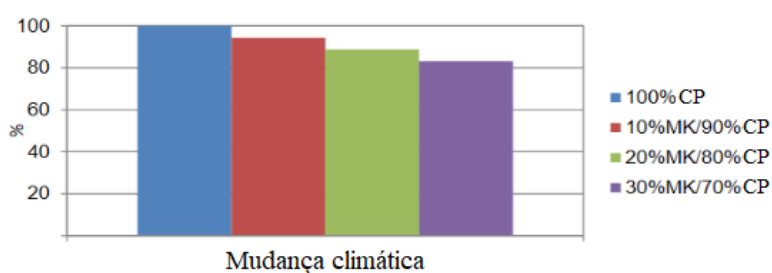


Figura 1 Emissões de CO₂ entre compósitos com cimento Portland e compósitos com teores de substituição de 10%, 20% e 30% de metacaulim (Fonte: *adaptado de DUMANI E MAPIRAVANA, 2018*)

Segundo Dumani e Mapiravana (2018), apesar de suas propriedades potenciais e dos vários estudos que apontam a melhoria do desempenho e os benefícios ambientais da utilização da metacaulinita como substituto parcial do cimento Portland, o seu uso em toda a indústria ainda está para acontecer devido ao seu preço de mercado relativamente alto.

Dentre as alternativas estratégicas desenvolvidas para reduzir a pegada de carbono na indústria da construção civil, estão a utilização de tecnologias mais eficientes, o uso de combustíveis com menores fatores de emissão, e, principalmente, utilização de materiais renováveis (HUNTZINGER; EATMON, 2009; OLIVEIRA *et al.*, 2014).

Rigon (2015) comparou as emissões de CO₂ de um concreto de 20% de substituição de cinza de casca de arroz com um concreto de referência (100% de cimento Portland) utilizando o método de Análise de Ciclo de Vida (ACV). De acordo com os resultados, houve uma diminuição de 24% nos valores de emissão de CO₂ eq/m³ de concreto para todas as distâncias de transporte avaliadas. Realizando a comparação entre os concretos, o concreto com 20% de CCA reduziu os valores de emissão de CO₂ eq em aproximadamente 121 kg de CO₂ eq/m³ de concreto.

O Brasil detém um elevado potencial agrícola, o que torna inerente a geração da elevada quantidade de resíduos agroindustriais que comumente são dispostos na natureza de forma inadequada. O seu uso na construção civil, por outro lado, poderia minimizar a extração de recursos naturais com a incorporação de recursos renováveis. A utilização de resíduos industriais na construção civil amplia o ciclo de vida destes materiais, o que representa uma solução ambientalmente correta para subprodutos de outros processos industriais. Deste modo, a incorporação destes resíduos em concretos e argamassas tornou-se uma potencial alternativa devido à capacidade de aperfeiçoar o desempenho de compósitos cimentícios em termos de comportamento mecânico, durabilidade e, sobretudo, de sustentabilidade.

Diante disso, a durabilidade das estruturas tornou-se uma preocupação a nível mundial em decorrência da crescente quantidade de estruturas degradadas desde as últimas décadas, e outros requisitos para além do comportamento mecânico da estrutura passaram a ser levados em consideração. O contato da camada superficial do compósito com o ambiente é determinante para o desencadeamento dos processos de degradação, e, em se tratando de estruturas de fibrocimento, as fibras muitas vezes apresentam-se à superfície (CORREIA, 2011). Assim, a análise da durabilidade de compósitos reforçados com fibras de sisal faz-se necessária, tendo em vista o desempenho que essas fibras proporcionam aos compósitos cimentícios.

Ademais os processos de degradação, aspectos socioeconômicos também estão inseridos no contexto da durabilidade dos materiais compósitos. Para Mehta e Monteiro (2014), os custos destinados à manutenção das edificações se tornou parcela substancial no orçamento total da construção em função dos gastos com reparos e substituição das estruturas por falhas nos materiais.

Deste modo, considerando o aspecto durabilidade como fator determinante para o processo degradativo do concreto convencional, torna-se relevante a análise da deterioração, sobretudo química e mecânica, às quais estão suscetíveis estes compósitos. E, tendo em vista o contexto ambiental, notadamente em relação à otimização da pegada de carbono, a proposta do presente trabalho consiste no desenvolvimento de compósitos ecoeficientes reforçados com fibras de sisal e cinza de casca de arroz como substituição parcial ao cimento.

1.1 OBJETIVOS

Esse estudo tem como objetivo geral avaliar a influência da incorporação da cinza de casca de arroz como substituição parcial ao cimento Portland em compósitos cimentícios reforçados com fibras curtas de sisal submetidos a ataque químico.

E tem como objetivos específicos:

- comparar o efeito da substituição da metacaulinita pela cinza de casca de arroz no desempenho dos compósitos reforçados com fibra de sisal;
- avaliar o efeito da substituição do cimento Portland por 50% de cinza de casca de arroz em compósitos reforçados com fibra de sisal;
- analisar o efeito do aumento da fração volumétrica da fibra de sisal em compósitos cimentícios;
- verificar o efeito do ataque ácido e ataque de sulfatos sobre a tração na flexão em compósitos reforçados com fibras de sisal.

1.2 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

O presente estudo está dividido em 5 seções estruturadas da seguinte forma:

Seção 1: traz a introdução sobre o tema, apontando a relevância do estudo e os objetivos gerais e específicos e organização do trabalho.

Seções 2, 3 e 4: constam o referencial teórico sobre a cadeia produtiva e as principais características da cinza de casca de arroz, bem como as propriedades dos materiais compósitos com fibra de sisal. Foram abordados também aspectos relevantes sobre desempenho, durabilidade e vida útil de elementos construtivos com ênfase em ataques ácidos e ataque por sulfatos, além de tratar a relevância de adições pozolânicas, especialmente a metacaulinita e cinza de casca de arroz, sobre as alterações que proporcionam quando incorporadas às misturas.

Seção 5: discorre sobre os materiais e métodos utilizados na pesquisa e resultados de caracterização dos materiais utilizados, bem como os procedimentos empregados na dosagem, produção e caracterização dos compósitos. A metodologia empregada para análise de durabilidade perante o ataque ácido e por sulfatos também foi descrita neste capítulo.

Seção 6: apresenta e discute os resultados referentes às propriedades físicas e mecânicas, bem como o efeito do ataque por ácido e por sulfatos sobre as propriedades

mecânicas dos compósitos produzidos com os diferentes teores de cinza de casca de arroz e fibras.

Seção 7 e 8: apresentam as conclusões do estudo e sugestões de temas para pesquisas futuras, respectivamente.

2. CADEIA PRODUTIVA DA CINZA DE CASCA DE ARROZ

O arroz é um dos principais cereais produzidos no mundo e, cultivado em todos os continentes, tanto na região tropical quanto na região subtropical, é caracterizado como principal alimento para mais da metade da população mundial

Segundo a última análise mensal realizada pela Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB), o Brasil não só produziu como também consumiu aproximadamente 11 milhões de toneladas de arroz na safra de 2019/2020 (CONAB, 2020). Já no mercado internacional, segundo dados do United States Department of Agriculture (USDA), a produção e o consumo mundial de arroz na Safra 2018/2019 foi de 491 milhões de toneladas e 489 milhões de toneladas, respectivamente. Para atingir essa quantidade são utilizadas diversas técnicas de plantio e diferentes cultivares nas distintas regiões onde o arroz é cultivado (CONAB, 2018).

O arroz passa por um processo de classificação após a colheita, que o divide em dois grupos. O primeiro é o arroz com casca, que é um produto que não passa por nenhum preparo industrial ou processo tecnológico; o segundo grupo é o arroz beneficiado, onde o arroz é processado para ficar desprovido da casca (CONAB, 2015).

A casca do arroz é uma capa protetora que se forma durante o processo de crescimento do grão e possui baixa densidade e elevado volume. Este revestimento tem uma característica fibrosa, sendo seus maiores constituintes a celulose (50%), lignina (30%) e resíduos inorgânicos (20%). Do percentual inorgânico contido na casca do arroz, aproximadamente 95% é formado por sílica hidratada no estado amorfo. No entanto, este percentual pode variar de acordo com as condições de plantio e a elevada reatividade da sílica presente na cinza de casca de arroz depende do método de obtenção empregado (POUEY, 2006).

Por não ser um produto com elevado valor nutricional, a casca do arroz não é atraente para a alimentação humana ou animal e por isso seu uso é aplicado para outras finalidades, como na geração de energia. Devido ao seu elevado poder calorífico, a casca de arroz passou a ser reintroduzida no processo produtivo do arroz como um potente combustível alternativo. A sua queima trouxe vantagens econômicas e ambientais, devido à substituição da lenha com custo praticamente nulo, além de eliminar quantidades volumosas do material descartado na natureza (POUEY, 2006).

Por fim, a cinza da casca de arroz é um resíduo decorrente do processo de combustão da casca do arroz e que faz parte da cadeia produtiva deste grão. É um

resíduo leve, altamente poroso e volumoso e possui um elevado teor de sílica amorfa que o torna um recurso alternativo com grande potencial para ser empregado na construção civil, mais especificamente em compósitos cimentícios.

3. PROPRIEDADES DE COMPÓSITOS COM FIBRAS CURTAS DE SISAL

O concreto é um dos materiais mais consumidos no mundo devido a vantagens como fácil obtenção dos insumos, baixo custo, produção simples e flexibilidade de aplicações. No entanto, materiais de matriz cimentícia apresentam desvantagens como fragilidade, isto é, baixa resistência à tração e baixa resistência à abertura e à propagação de fissuras. Dessa forma, a incorporação de fibras em compósitos cimentícios surgiu como forma de superar essas desvantagens (SILVA JUNIOR, 2020; FAN E WECLAWSKI, 2017; BRANDT, 2008).

A utilização de fibras, vegetais ou sintéticas, como reforço de matrizes cimentícias têm a função controlar a propagação de microfissuras que surgem quando a tensão aplicada supera a resistência à tração do material. As fibras naturais não são utilizadas para aplicações estruturais de alto desempenho pois não têm influência expressiva sobre o aumento da resistência à compressão ou tração do material. Portanto, alguns estudos buscam desenvolver produtos que possam ser aplicados em residências de baixo custo, como placas de cobertura, ou aplicações em painéis estruturais, reforços e reparações de elementos estruturais (RIBEIRO *et al.* 2021; SILVA JUNIOR, 2020).

Pesquisas apontam que a incorporação de fibras de sisal em argamassas de cimento promove melhoria na ductilidade, deformação última e tenacidade e resistência à flexão em seu estado pós fissuração quando comparados com materiais cimentícios sem reforço. Essas propriedades estão intimamente relacionadas com a estrutura interna do compósito fibroso (TOLEDO FILHO *et al.*, 1999; LIMA, 2004; TOLEDO FILHO *et al.*, 2003; TOLEDO FILHO *et al.*, 2005).

A estrutura interna de um compósito cimentício reforçado com fibra de sisal é composto por três fases: a matriz, as fibras e a interface fibra-matriz. O desempenho das propriedades mecânicas está diretamente relacionado com o nível de aderência verificado na zona de interface e que irá depender de características diversas tanto da fibra (volume, geometria, tipo de material, orientação, condição superficial), quando da matriz (composição, propriedades físicas e mecânicas e condição de fissuração) (LIMA, 2004).

Segundo Lima (2004), a aderência é definida como uma tensão cisalhante na interface entre a fibra e a matriz que a envolve. Nos materiais compósitos, é por aderência que ocorre a transmissão de forças entre estas fases, uma vez que há uma ação conjunta onde parte das tensões solicitantes são resistidas pela matriz e outra pelas fibras.

De acordo com Bentur, Mindess e Routledge (2006), a eficácia das fibras no melhoramento desempenho mecânico de uma matriz cimentícia frágil depende em grande parte das interações fibra-matriz, sendo a adesão química e física uma das interações mais importantes. De modo geral, a adesão fibra-matriz é fraca, por esse motivo, em alguns casos como o deste estudo, são realizados tratamentos por meio de processos químicos no reforço fibroso para melhorar esta zona. Como as propriedades dos compósitos reforçados com fibras dependem dos seus materiais constituintes e está fortemente ligada à sua estrutura interna, a caracterização dos componentes internos é essencial para viabilizar uma análise consistente do comportamento do compósito sob diferentes condições de carregamento.

Segundo Lima, Toledo Filho e Melo Filho (2014), a curva tensão-deformação do compósito carregado sob compressão é caracterizada por um trecho ascendente até um pico de tensão e em seguida por um ramo descendente. Antes do carregamento a matriz pode já apresentar microfissuras, no entanto, elas não se propagam sob cargas relativamente baixas. Com o incremento gradativo do carregamento, há uma variação da rigidez interna da matriz que desencadeia um crescimento progressivo de microfissuras começando pela interface matriz agregado, seguindo para a pasta de cimento endurecida, até atingir macrofraturas contínuas em torno do pico de tensão até a fratura espontânea do corpo de prova. A queda pós-pico da curva representa um amolecimento proveniente do crescimento da macrofratura, indicando que nenhuma outra trinca aparecerá em função da diminuição da carga.

O efeito das fibras do comportamento à compressão pode atuar tanto na tensão pré pico diminuindo a tensão máxima e o módulo de elasticidade da matriz, quanto na pós-pico onde a fibra atua como ponte de transferência de tensões por cruzar as faces da trinca. A presença de fibras descontínuas tende a reduzir a propagação instável de macrofraturas proporcionando um comportamento dúctil pós pico. Isso ocorre pois as fibras têm a capacidade de redistribuir as tensões na matriz, suprimindo a abertura de fissuras. Portanto, a adição de fibras resulta em um incremento da tenacidade do

material, com maior absorção de energia e melhor controle da propagação de fissuras (LIMA, TOLEDO FILHO E MELO FILHO, 2014).

A Figura 2 ilustra a curva tensão-deformação sob esforços de compressão de compósitos reforçados com fibra de sisal em frações volumétricas iguais a 1%, 2% e 3%. Lima, Toledo Filho e Melo Filho (2014) observaram a queda da tensão de pico com o aumento do percentual do volume de fibras.

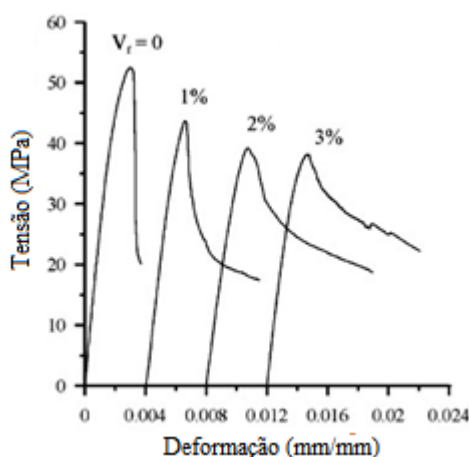


Figura 2 Curvas típicas de tensão-deformação em ensaio de resistência à compressão de compósitos reforçados com fibras de sisal com comprimento de 25mm (Fonte: *adaptado de LIMA et al. 2014*)

Ao analisar resultados de resistência à flexão de compósitos reforçados com fibras de sisal, pode ser visto que o comportamento da curva tensão-deformação começa com um intervalo elástico-linear, isto é, o material compósito se comporta de forma linear até um ponto onde a matriz se quebra. Após o surgimento da primeira fissura, inicia-se a faixa pós-fissuração onde é caracterizada por uma fissuração múltipla até que não se formem mais fissuras (SANTOS, 2020; LEITE, 2019; LIMA *et al.* 2016; FERREIRA, 2012; MELO FILHO *et al.* 2007).

Melo Filho *et al.* (2007) produziram compósitos reforçados com fração volumétrica igual a 6% e verificaram um comportamento de múltipla fissuração na flexão com valores médios de resistência à flexão de 7,20 MPa e tenacidade de 3,86 kJ/m².

Lima *et al.* 2016 desenvolveram compósitos reforçados com 4% e 6% de fibras curtas de sisal em volume e observaram que o reforço fibroso garantiu compósitos com múltiplas fissuras, além de reduzir a rigidez e aumento da capacidade de amortecimento do compósito com fissuração progressiva.

Santos (2020) avaliou as propriedades mecânicas de compósitos reforçados com fibras de sisal em frações volumétricas iguais a 2%, 3% e 4% e verificou um aumento expressivo na tenacidade e ductilidade em relação à matriz de referência (sem fibras). Em contrapartida, foi observado uma diminuição da resistência à compressão e trabalhabilidade do material com o aumento das frações volumétricas de fibras.

Iniya e Nirmalkumar (2020) testaram concretos com volume de fibras de sisal que variaram de 0,5% a 2% e concluíram que incorporar fibras vegetais no concreto proporciona um melhor controle do processo de fissuração devido ao aumento verificado na resistência à flexão, resistência à fratura e ductilidade das amostras.

Os compósitos desenvolvidos por Lima, Toledo Filho e Melo Filho (2013) obtiveram diminuição da resistência à compressão de 30,41 MPa para 21,22 MPa ao aumentarem o teor de fibras de sisal dos compósitos de 4% para 6%. Além disso concluíram que a adição de fibras curtas de sisal às matrizes de cimento tendem a reduzir o pico de tensão, o módulo de elasticidade e a deformação na ruptura e aumentar a tenacidade da matriz.

3.1 DURABILIDADE DAS FIBRAS DE SISAL EM MATRIZES CIMENTÍCIAS

Como visto anteriormente, as fibras vegetais podem ser utilizadas para fabricar elementos construtivos de concreto e argamassa com variados tipos de aplicações. No entanto, como é característico das fibras vegetais, as fibras de sisal são materiais lignocelulósicos e por isso possuem natureza hidrofílica, o que as tornam incompatíveis com as matrizes cimentícias. Nesses casos, o compósito pode sofrer um envelhecimento em ambientes úmidos comprometendo a sua durabilidade devido ao efeito combinado do ataque dos álcalis à lignina e hemicelulose, e da mineralização das fibras resultante da migração do hidróxido de cálcio (CH) da matriz para o lúmen e paredes das fibro-células (TOLEDO FILHO, 1997; GRAM, 1988).

Portanto, o enfraquecimento da fibra de sisal está associado ao ataque alcalino da matriz às fibras, que corresponde ao processo degradativo ocasionado pela presença de elevados teores de hidróxidos de cálcio; à mineralização das fibras onde ocorre a migração de produtos de hidratação, principalmente hidróxido de cálcio, para o lúmen das fibras, paredes e vazios; e à variação volumétrica das fibras que é o mecanismo provocado pela sua elevada capacidade de absorção de água, comprometendo a aderência fibra-matriz.

Estes três fatores determinantes estão diretamente associados à estrutura microscopicamente esponjosa que as fibras assumem após o seu beneficiamento. Essa estrutura é formada por várias células individuais, conhecidas como microfibras, e são unidas umas às outras por lamelas intermediárias, compostas de hemicelulose e lignina, conforme ilustra a Figura 3.

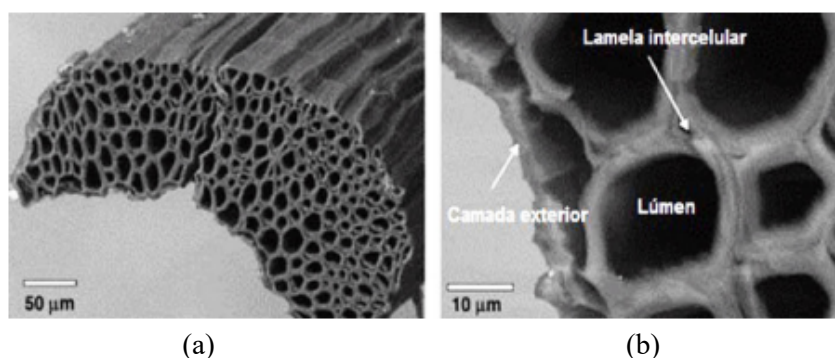


Figura 3 Morfologia da fibra de sisal: (a) fibra composta pelo conjunto de células individuais e (b) detalhe da célula individual (Fonte: SILVA et al. 2010)

No interior de cada célula há o lúmen, um espaço vazio que influencia diretamente no comportamento mecânico da fibra de sisal. Quando embebidas na matriz cimentícia, substâncias agressivas tendem a penetrar em sua estrutura, ocupando estes vazios e degradando os seus componentes devido ao processo de cristalização. Uma vez cristalizados, os produtos de hidratação do cimento enrijecem nesta cavidade central, causando a fragilização da fibra. Esse processo é denominado mineralização da fibra (K. PERSSON, 2000, 2014 *apud* IZQUIERDO E RAMALHO, 2014).

Dada a estrutura esponjosa da fibra de sisal, verificou-se outra desvantagem acerca de sua utilização. A elevada capacidade de absorção de água em função de sua estrutura porosa que provoca alterações de seu volume com a mudança do teor de umidade do compósito. Este comportamento resulta numa perda de contato físico com a matriz comprometendo a sua aderência.

Para melhorar a aderência fibra-matriz e a estabilidade dimensional das fibras de sisal, diversos estudos foram desenvolvidos utilizando técnicas de tratamento, químicos ou físicos. Dentre os tratamentos verificados na literatura, pode-se citar estudos que utilizaram ciclos de molhagem e secagem, denominado hornificação (FERREIRA, 2012; FERREIRA *et al.* 2017; SANTOS E LIMA, 2013; DINIZ, GIL E CASTRO, 2004), revestimento com polímeros (KUNDU *et al.* 2012) e ainda lavagem alcalina (FERRAZ *et al.* 2011; SANTOS, 2020),

Os tratamentos podem modificar quimicamente a superfície da fibra, aumentar a rugosidade superficial, diminuir a absorção de água, promover modificações morfológicas, como é ilustrado na Figura 4 em que é possível identificar a diminuição da porosidade na estrutura das fibras antes e após o tratamento de hornificação através da redução do lúmen. Neste caso, a maior estabilidade dimensional da fibra obtida pelo processo de hornificação é atingida devido às alterações permanentes causadas pelo aumento das ligações entre as microfibrilas de sua estrutura (DINIZ, GIL E CASTRO, 2004).

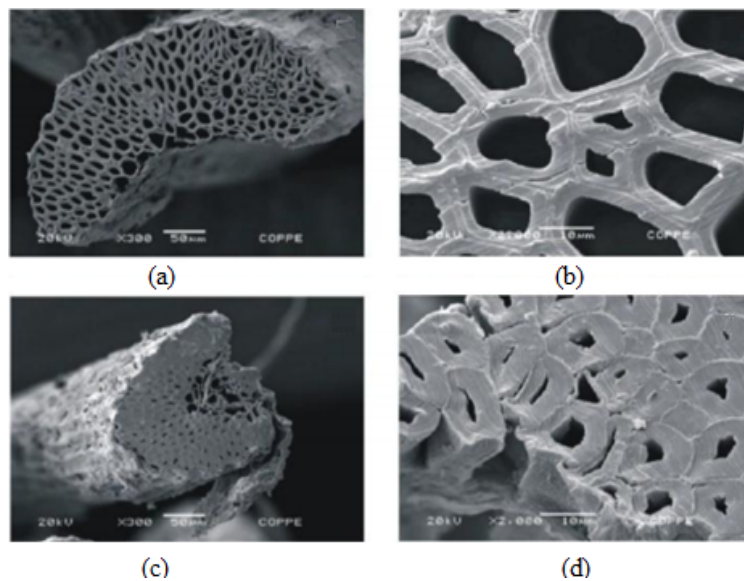


Figura 4 Seção transversal da fibra de sisal. (a-b) sem o tratamento de hornificação; (c-d) após tratamento (Fonte: Ferreira *et al.* 2012)

Em programa experimental desenvolvido por Ferreira *et al.* (2012), ensaios de arrancamento da fibra de sisal em matriz de cimento Portland foram realizados, utilizando comprimentos de 25 mm e 50 mm, com o objetivo de verificar se a possível estabilidade dimensional decorrente da hornificação aumentava a adesão fibra-matriz. Os resultados mostraram maior estabilidade dimensional, redução na capacidade de absorção de água, aumento na resistência à tração e capacidade de deformação e redução no módulo de elasticidade da fibra de sisal. Um incremento na carga de arrancamento foi observado indicando uma maior aderência da fibra que foi submetida à 10 ciclos de molhagem e secagem.

Outro tratamento utilizado é o tratamento alcalino que, além de retirar resíduos provenientes do processo de manufatura, é capaz de remover parcialmente a hemicelulose e lignina das fibras, promovendo um melhor empacotamento das cadeias

de celulose que são responsáveis pela cristalinidade da fibra. Assim, o tratamento aumenta a cristalinidade e reduz o diâmetro das fibras (BLEDZKI E GASSAN, 1999; SANTOS, 2020).

Santos (2020) avaliou o desempenho de compósitos reforçados com fibras curtas de sisal submetidas ao tratamento de hornificação e lavagem alcalina em frações volumétricas iguais a 2%, 3% e 4%. O estudo apontou que os compósitos reforçados com fibras submetidas ao tratamento alcalino apresentaram tenacidades ligeiramente maiores em relação aos compósitos reforçados com fibras hornificadas.

Toledo Filho *et al.* (2000) investigaram a durabilidade das fibras de sisal e coco expostas a soluções alcalinas de hidróxido de cálcio e sódio. O estudo mostrou que as fibras mantidas em pH 12 perderam completamente a sua flexibilidade e resistência após 300 dias. Os autores também examinaram compósitos de cimento reforçados com fibras de sisal envelhecidas, e verificaram que após seis meses de exposição ao intemperismo, ar livre e ciclos de umedecimento e secagem, houve uma redução significativa da tenacidade. Concluiu-se, portanto, que a fragilização dos compósitos estaria associada à mineralização das fibras.

Deste modo, muitas pesquisas se direcionaram para melhorar a sua durabilidade buscando formas de mitigar o efeito deletério da matriz alcalina sobre as fibras. Diversos pesquisadores, como Wey e Meyer (2016), Ferreira *et al.* (2012) e Ardanuy *et al.* (2010), observaram que a incorporação de adições minerais poderia ser eficiente para consumir o teor de hidróxido de cálcio livre na matriz, composto este responsável pela alcalinidade do compósito. Dessa forma, a diminuição do pH tornaria o ambiente favorável para a presença de fibras, além de esgotar a reserva de hidróxido de cálcio disponível, evitando a mineralização das mesmas.

Como é possível observar, os estudos que tratam da durabilidade de compósitos reforçados com fibras de sisal apresentam duas tendências. Uma está relacionada ao tratamento prévio das fibras de sisal como forma de diminuir a sua variação volumétrica e aumentar a sua estabilidade dimensional. A segunda vertente está associada à modificação da composição da matriz como forma de reduzir, parcial ou totalmente, a reserva alcalina. Adições pozolânicas são então utilizadas como forma de consumir o hidróxido de cálcio livre, diminuindo a alcalinidade e evitando a mineralização das fibras, além de influenciar as zonas de interface melhorando a adesão.

3.2 USO DE ADIÇÕES POZOLÂNICAS EM COMPÓSITOS REFORÇADOS COM FIBRA DE SISAL

Como visto, quando expostas a um ambiente alcalino, as fibras de sisal podem sofrer degradação em função da perda de sua capacidade de deformação. Por isso, algumas técnicas têm sido propostas para garantir a durabilidade dos compósitos reforçados com fibras vegetais. Uma delas é a modificação da matriz por meio do uso de adição de materiais pozolânicos, como a metacaulinita e cinza de casca de arroz, com intuito de reduzir o teor de CH livre e melhorar a durabilidade dos compósitos.

3.2.1 Metacaulinita (MK)

Os primeiros estudos que avaliaram o desempenho de compósitos cimentícios reforçados com fibras de sisal através da modificação da matriz através da incorporação de materiais pozolânicos utilizaram a metacaulinita.

Farias Filho (1999) avaliou compósitos reforçados com fibra de sisal com teores de 20%, 40% e 50% de metacaulinita em substituição parcial ao cimento e observou através de ensaios de difratometria de raios X e termogravimetria que os teores de CH livre nas pastas diminuíram substancialmente com o aumento dos teores de adição ou aditivo, melhorando o desempenho sob esforços de compressão das amostras. No entanto, concluiu que a resistência à flexão não foi significativamente afetada pela presença dos materiais pozolânicos.

Segundo Lima e Toledo Filho (2008) a utilização de metacaulinita associado à incorporação de fibras vegetais na produção de compósitos cimentícios resultou em um material ecologicamente mais eficiente do que os tradicionais. Os autores utilizaram 30% de teor de substituição, em massa, do cimento Portland por metacaulinita e analisaram o comportamento mecânico sob flexão dos compósitos compostos por 1%, em volume, de fibras de sisal. Os resultados apontaram que a utilização de metacaulinita resultou em redução do teor de hidróxido de cálcio, aumento da resistência à compressão em 16,55% e redução da porosidade. Mecanicamente, com a adição de metacaulinita, os compósitos sob flexão mantiveram 86% da resistência de primeira fissura mesmo após 25 ciclos de envelhecimento acelerado, enquanto os compósitos com matriz sem adições tornaram-se frágeis, sem resistência pós-fissuração, após 12 ciclos.

Farias Filho, Toledo Filho e Lima (2010) analisaram o comportamento sob flexão de compósitos com substituição parcial do cimento Portland por metacaulinita e resíduo de tijolo moído em teores de 20 e 40% em peso. Os resultados mostraram que é possível consumir todo o hidróxido de cálcio da matriz evitando a mineralização das fibras. Além disso, a tenacidade do compósito foi mantida e a resistência à flexão obteve acréscimo após exposição natural ou ciclos de molhagem e secagem.

Santos (2020) avaliou compósitos reforçados com fibras curtas de sisal e com substituição do cimento por 30% de metacaulinita, 10% de sílica ativa e 10% de cinza volante atingindo o objetivo de produzir uma matriz de cimento com baixo teor de hidróxido de cálcio. Análises termogravimétricas foram realizadas e os resultados apontaram um teor de CH menor que 0,7%, após 28 dias de cura.

3.2.2 Cinza de casca de arroz (CCA)

O elevado conteúdo de sílica amorfa e área superficial específica têm aumentado o interesse pelo uso de cinza de casca de arroz como material de substituição ao cimento Portland. Pesquisas mostraram benefícios do uso de partículas de cinza de casca de arroz em função da sua alta reatividade, que aumenta o consumo de CH proveniente da hidratação do cimento (VIEIRA, 2018). Por conseguinte, quando se trata de compósitos reforçados com fibras de sisal, prevê-se que o uso da CCA pode melhorar efetivamente a sua durabilidade ao mitigar a degradação e mineralização do reforço fibroso.

Tashima (2006) e Pereira *et al.* (2015) avaliaram a influência de 10 e 15% de CCA em argamassas e concretos e constataram um incremento na resistência em todas as amostras estudadas. Hoppe (2005) identificou um ganho de 26% em concretos com incorporação de 30% de CCA em substituição ao cimento Portland.

Wei e Meyer (2016) testaram o comportamento à flexão de vigas reforçadas com fibras de sisal submetidas a 30 ciclos de molhagem e secagem. A durabilidade dos compósitos foi melhorada consideravelmente pela incorporação de cinza de casca de arroz devido à mitigação da degradação das fibras. A resistência à tração final aumentou 384% comprovando que o teor de hidróxido de cálcio e a alcalinidade da matriz de cimento desempenham papéis decisivos nos ataques de álcalis e na mineralização das paredes celulares das fibras.

4. DURABILIDADE DE ELEMENTOS CONSTRUTIVOS

4.1 DESEMPENHO, DURABILIDADE E VIDA ÚTIL

O progresso industrial e o crescimento das cidades são considerados fatores determinantes para o desenvolvimento da indústria da construção civil. Dessa forma, o surgimento de novas tecnologias e processos construtivos, bem como mudanças nos materiais de construção tem sido verificado com o decorrer dos anos.

As exigências competitivas do setor têm fomentado a construção de estruturas cada vez mais esbeltas e econômicas, e, aliado ao desenvolvimento dos centros urbanos, os ambientes de exposição e procedimentos de cálculos sofreram grandes modificações ao longo do tempo. Por isso, muitas estruturas de concreto passaram a apresentar níveis de degradação superiores aos projetados, que, caracterizados pelo surgimento de manifestações patológicas, comprometem a qualidade e durabilidade das construções (POSSAN E DEMOLINER, 2013).

O envelhecimento precoce das estruturas despertou o interesse da comunidade técnico-científica sobre a investigação dos fatores que levariam à degradação das estruturas de concreto, bem como soluções para minimizar os danos decorrentes dos processos patológicos. É possível constatar que o parâmetro resistência mecânica tornou-se insuficiente para atender às exigências de projeto. Assim, conceitos como desempenho, durabilidade e vida útil ganharam relevância enquanto indicadores de qualidade das construções (HELENE, 1993; 1997; POSSAN E DEMOLINER, 2013; RIBEIRO *et al.*, 2018).

No Brasil, o conceito de desempenho foi introduzido tardiamente na construção civil. Somente em 2013 a Associação Brasileira de Normas Técnicas publicou uma norma de desempenho para edificações habitacionais, a NBR 15575. Esta norma determina parâmetros para especificação e elaboração de projetos, determinando requisitos mínimos de desempenho para edificações para melhorar a qualidade das mesmas atendendo às exigências de consumo.

A NBR 15575 (ABNT, 2013) ainda estabelece uma relação entre os conceitos de desempenho, durabilidade e vida útil ao associar a capacidade de uma edificação em manter determinado nível de qualidade durante determinado período de tempo, retardando o surgimento de manifestações patológicas.

Segundo Souza e Ripper (2009), desempenho é o comportamento em serviço de cada produto ao longo de sua vida útil, que por sua vez consistirá no resultado de

projeto aliado à sua construção e manutenção. Para Possan e Demoliner (2013), o desempenho de uma edificação é um parâmetro relativo, pois depende dos níveis de manutenção e das condições de exposição do ambiente em que a edificação será construída, como temperatura, umidade e ações externas provenientes da ocupação.

Já em relação à durabilidade, seu conceito é definido como a capacidade de desempenho funcional de uma estrutura ou de seus componentes de atender às condições de uso pré-estabelecidas em projeto. Este comportamento ocorre por um período específico de tempo sob influência das ações ambientais ou como resultado do processo de envelhecimento natural (ABNT 2013; NBR ISO, 2008).

De acordo com o *ACI Committee 201 apud Mehta e Monteiro (2014)*, a durabilidade de compósitos de cimento Portland corresponde a sua capacidade de suportar a ação de intempéries, ataque químico, ou qualquer outro processo de degradação sem comprometer o seu desempenho. Os autores afirmam ainda que nenhum material é genuinamente durável, pois suas propriedades inevitavelmente irão sofrer alterações em função de suas interações com o ambiente ao longo do tempo. Por isso, considera-se boa durabilidade como sinônimo de vida útil longa.

A NBR ISO 13823 (2008) associa o conceito de vida útil às ações de manutenção e reparo ao determinar que uma estrutura mantenha as condições de desempenho pré-determinadas sem que haja a necessidade de intervenções não previstas em projeto. Nesse sentido, surge o conceito de Custo do Ciclo de Vida, que por sua vez corresponde à estimativa de custos de manutenção, reparo ou reabilitação requeridos para satisfazer às previsões de vida útil da estrutura. Estes custos podem ser financeiros, ambientais e sociais.

O conceito de vida útil é resumido pela NBR 15575 (2013) como uma medida temporal da durabilidade de um edifício ou de suas partes. Possan e Demoliner (2013) complementam esta definição como o período de tempo compreendido entre o início de operação e uso de uma edificação até o momento em que o seu desempenho deixa de atender às exigências do usuário, influenciado diretamente pelas atividades de manutenção e reparo e pelo ambiente de exposição.

Para a Federação Internacional do Concreto, a *fib 53 (2010)*, a avaliação da durabilidade de uma estrutura pode ser realizada através de modelos que simulem processos de deterioração a que se está suscetível, associado ao uso de métodos de previsão de vida útil. Dessa forma, é possível constatar que os conceitos de desempenho, durabilidade e vida útil estão intimamente interligados, e ainda associados

diretamente à influência que o fator manutenção exerce sobre a perenidade das estruturas de concreto. Esta relação é apresentada esquematicamente pela Figura 5.

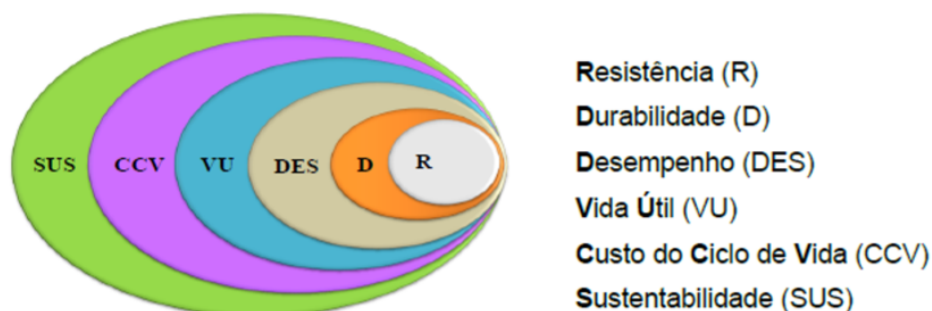


Figura 5 Evolução conceitual dos projetos de construções (Fonte: POSSAN E DEMOLINER (2013))

A Figura 5 representa a evolução conceitual dos projetos de construções, onde a sustentabilidade engloba os pré-requisitos necessários para se conceber uma estrutura.

De acordo com Possan e Demoliner (2013), fatores como competitividade, custos e preservação do meio ambiente modificaram a forma de se projetar estruturas de concreto, considerando ainda a importância da estimativa de custos do seu ciclo de vida e sua vida útil. A fundamentação destes conceitos está baseada na execução adequada da edificação proporcionando um desempenho satisfatório aliado a custos de manutenção razoáveis durante um determinado período de tempo.

4.2 DURABILIDADE E AGRESSIVIDADE AMBIENTAL

Em contrapartida à qualidade da matriz cimentícia, está a agressividade ambiental. Helene (1997) definiu agressividade ambiental como um fator associado às ações físicas e químicas sobre as estruturas, independentemente das ações mecânicas, das variações volumétricas de origem térmica, da retração hidráulica e outras previstas.

Uma vez que a degradação de um compósito é influenciada pelas condições ambientais, as variáveis atmosféricas são consideradas fatores determinantes na durabilidade de compósitos cimentícios. Dentre eles pode-se citar a radiação solar, temperatura, umidade, precipitação e vento (SOUZA *et al.*, 2017; SOUZA, RIPPER, 2009). A Figura 6 ilustra a relação entre as variáveis atmosféricas e a causa da degradação de construções.

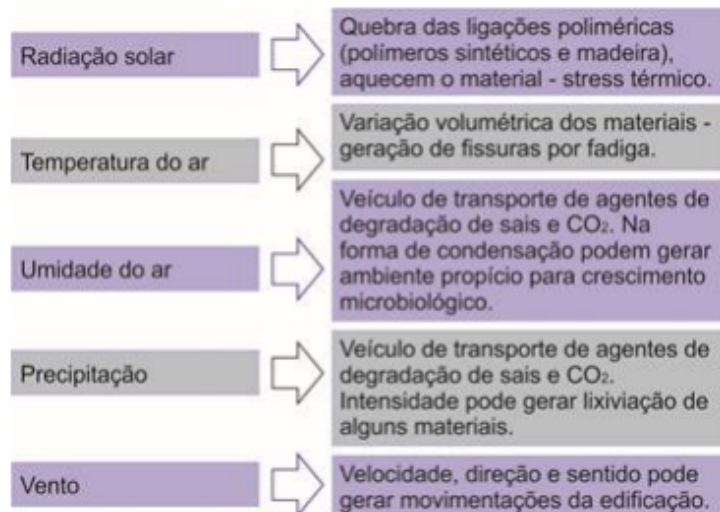


Figura 6 Degradação causada nas construções pelas variáveis atmosféricas (Fonte: SOUZA *et al.*, 2017)

Souza *et al.* (2017) destacou a radiação solar e temperatura do ar como as variáveis atmosféricas que mais influenciam a durabilidade dos materiais cerâmicos, como é o caso dos compósitos cimentícios. Isto ocorre devido à influência destes fatores tanto sobre a temperatura do material, quanto sobre a umidade do ambiente que impacta diretamente na umidade dos poros da matriz. Ademais, vinculado aos processos termodinâmicos da atmosfera, há a precipitação que influencia tanto o teor de umidade nos poros quanto o transporte de agentes agressivos para o interior do material.

O encadeamento de ações provocadas pelas principais variáveis ambientais que podem provocar a deterioração da matriz cimentícia é representado pela Figura 7.

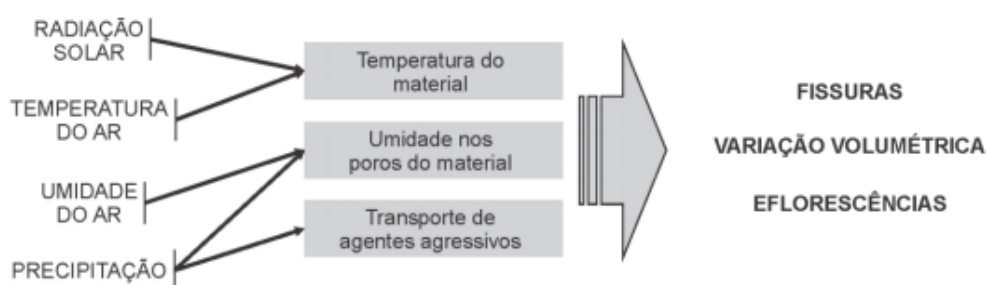


Figura 7 Ação das variáveis atmosféricas no desempenho dos compósitos cimentícios (Fonte: Souza *et al.* 2017)

Em se tratando de materiais cerâmicos, o coeficiente de dilatação térmica é o mais baixo dentre os materiais (aproximadamente $0,4 \times 10^{-6}$ a $13,5 \times 10^{-6}$ / K). Os polímeros e os metais têm coeficientes de dilatação térmica, aproximadamente, de 90×10^{-6} a 216×10^{-6} /K e $4,5 \times 10^{-6}$ a $23,6 \times 10^{-6}$ /K, respectivamente (CALLISTER JR *et al.* 2008). No entanto, pode-se observar, na Figura 7, que a temperatura do ar e a radiação solar

são capazes de alterar a temperatura do compósito provocando sua variação dimensional, acentuando, por conseguinte, seu processo de deterioração em virtude de sua baixa tenacidade.

Como visto, a umidade do ar e precipitação interferem na umidade do material. Desse modo, infere-se que a quantidade de água no concreto e sua proporção com os demais constituintes do compósito cimentício são de fundamental importância por reger propriedades como densidade, compacidade, porosidade, permeabilidade, capilaridade e fissuração, e ainda a resistência mecânica da matriz. Todas estas propriedades são consideradas indicadores de qualidade de um compósito, uma vez que a impermeabilidade deve ser a primeira linha do sistema de defesa contra qualquer processo físico-químico de deterioração (SOUZA E RIPPER, 2009).

Portanto, compreende-se durabilidade como a capacidade que um elemento construtivo tem de manter sua qualidade e formas originais resistindo à deterioração do ambiente no qual está exposto. Esta deterioração pode ser causada pelo ataque de agentes deletérios ou de produtos químicos, como sulfatos e ácidos.

Dada a importância relacionada à ação de sulfatos e ácidos para as estruturas de concreto armado, que são as convencionalmente utilizadas nas construções, é que o presente estudo questiona de que forma esses agentes podem se comportar em meio a um compósito não armado.

4.2.1 Ataque ácido

De modo geral, compósitos de cimento Portland não têm boa resistência ao ataque ácido em virtude da alcalinidade de sua matriz. Um aspecto positivo em relação às condições ambientais é que a ocorrência de soluções ácidas na natureza é limitada em comparação à cloretos e sulfatos, por exemplo.

Entretanto, existem estruturas que estão propensas à incidência mais frequente de ácidos, como aquelas expostas a chuvas ácidas ou em contato direto com águas contaminadas por dejetos industriais, ou até mesmo inseridas no próprio ambiente industrial que contém gases nocivos na presença de umidade como mostra da Figura 8 (BRANDÃO, 1998).



Figura 8 Ataque químico por ácido sulfúrico em pilar de indústria de fertilizantes (Fonte: AGUIAR, 2006)

Dentre os principais ácidos nocivos ao concreto encontrados em ambientes industriais, podem-se citar os ácidos acético, fórmico ou láctico, encontrados em produtos alimentícios; soluções de cloreto de amônia e sulfato de amônia, presentes nas indústrias de fertilizantes e agricultura; ácido carbônico como em refrigerantes e águas naturais com elevada concentração de gás carbônico; ácido sulfúrico presente em efluentes de indústrias químicas, e na atmosfera industrial decorrente da queima de combustíveis (RIBEIRO *et al.*, 2018).

A enorme quantidade desses gases poluentes emitidos pelas indústrias pode reagir com o vapor d'água presente na atmosfera, que, ao precipitar sob forma de chuva ácida, se acumula sobre as construções e ao evaporar, permite a deposição dos sais nela contidos. A continuidade desse processo vai progressivamente aumentando a quantidade de sais sobre a estrutura e, por consequência, a concentração de íons agressivos na superfície que podem gerar sérios problemas como é o caso dos sulfatos que penetram a matriz promovendo a sua desagregação (SILVA FILHO, 1994)

O efeito desses ácidos está associado basicamente à diminuição da alcalinidade da matriz. Além disso, os ânions contidos nessas soluções ácidas podem ser lixiviados, levando ao aumento da porosidade e permeabilidade do concreto.

De modo geral, o ataque ácido ocorre a partir da conversão dos compostos de cálcio (hidróxido de cálcio, silicato hidratado de cálcio e aluminato hidratado de cálcio) em sais de cálcio, cuja composição dependerá do tipo de ácido que irá atacar a matriz. Essa reação destrói a integridade da microestrutura da superfície do material, e é controlada pela solubilidade dos sais formados. Se ocorrer dissolução ou abrasão da camada superficial, novas camadas serão expostas, proporcionando a continuidade do processo até desintegração total do material (SILVA FILHO, 1994)

Assim, a degradação ocorre a partir da reação entre os elementos ácidos e os elementos compostos de cálcio da pasta de cimento endurecido, são eles os silicatos, aluminatos e hidróxidos de cálcio. As reações de solubilização produzem sais de cálcio que são facilmente lixiviados pela matriz, como por exemplo, os ácidos clorídricos que formam cloretos de cálcio e ácidos nítricos que resultam em nitrato de cálcio. Vale ressaltar que agregados de calcário e dolomíticos também estão susceptíveis à ação dos ácidos (BRANDÃO, 1998).

Logo, observa-se que na maioria dos casos, o produto das reações deletérias é a formação de compostos de cálcio solúveis em água que, ao serem lixiviados, reduzem a capacidade de ligação entre os constituintes do compósito, causando o enfraquecimento da matriz.

Um aspecto a ser considerado é o grau de solubilidade dos sais formados pela reação química dos ácidos com os elementos da pasta hidratada. Essa propriedade influencia a velocidade do ataque à matriz (BERTOLINI, 2010).

No entanto, essa não é uma propriedade característica de todos os tipos de sais. Ácidos como tartárico, oxálico, tânico, húmico, hidrofluórico e fosfórico, ao reagir com produtos hidratados na presença de água agressiva, formam sais insolúveis. Casos como esses são exceções pois não apresentam riscos estruturais por não serem facilmente removidos. Isto é, sua remoção pode ocorrer por meio de processos físicos como erosão (contato com águas e fluidos superficiais) ou abrasão (MEHTA E MONTEIRO, 2014).

Além das estruturas situadas em ambientes industriais, é muito comum a ocorrência de ataques ácidos em estruturas em contato com águas residuais, como tubulações de esgoto ou de redes de tratamento de água. Isso ocorre com o ácido sulfúrico, objeto deste estudo.

A Figura 9 é uma representação esquemática da formação do ácido sulfúrico em tubulações de esgoto e de como se procede a sua deterioração ao concreto ao ser convertido em sulfato de cálcio.

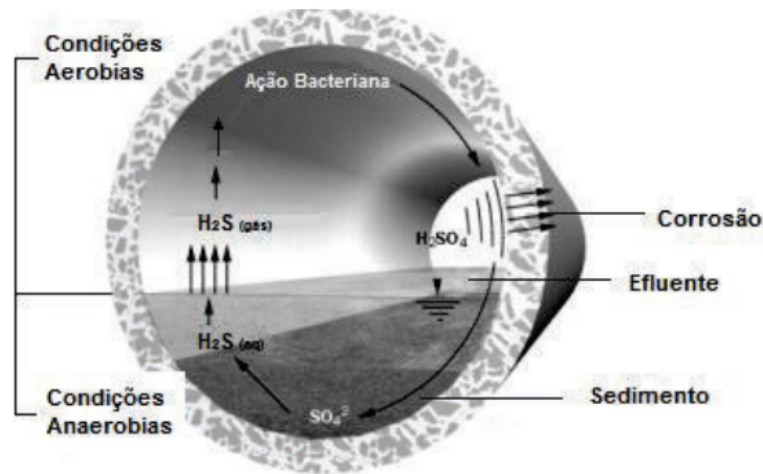


Figura 9 Processo de formação do ácido sulfúrico em tubulações de esgoto (Fonte: ROMANOVA *et al.* 2015)

Em condições anaeróbias, isto é, na ausência de oxigênio, as bactérias redutoras de sulfato (anaeróbias) presentes na lama que se acumula no fundo das tubulações, reduzem os compostos de enxofre presentes no esgoto transformando-os em sulfeto de hidrogênio (H_2S). Em seguida, através da ação das bactérias oxidantes de enxofre (aeróbias) que vivem a superfície do concreto, o H_2S desprende-se do esgoto sob forma gasosa e é convertido em ácido sulfúrico (H_2SO_4). Este ácido pode ser altamente deletério por reagir com produtos hidratados, formar o sulfato de cálcio desencadear o processo conforme descrito no tópico 4.2.2 (GÓIS, 2016; RIBEIRO *et al.*, 2018).

Cabe ainda salientar que há uma grande diferença entre o ataque por ácidos e o ataque por sulfatos. No primeiro caso, a rede de poros é degradada de forma geral, uma vez que os ácidos reagem com praticamente todos os componentes do cimento. No segundo, apenas componentes específicos são atacados. Em ambos os casos, a permeabilidade do material é comprometida (BRANDÃO, 1998).

Em geral, a ação de ácidos é capaz de gerar danos consideráveis à matriz cimentícia apesar de não ser uma ocorrência tão comum, uma vez que, na prática, a agressão só se configura para pH menor que 6,5. Como nenhum concreto resiste à substâncias com pH inferior a 3 por muito tempo, proteções especiais tornam-se necessárias.

De acordo com Paulon (1986) *apud* Brandão (1998), em casos menos severos de ataque ácido, é possível tomar medidas preventivas dentre as quais pode-se citar a redução da permeabilidade do concreto através da determinação de um fator água/cimento de até 0,45 para estruturas em contato com esgoto doméstico e sempre

que possível minimizar o tempo de exposição das estruturas aos ácidos e evitar a imersão.

4.2.2 Ataque por sulfatos

Os sulfatos são considerados importantes agentes agressivos apesar de não oferecerem risco às estruturas quando em estado sólido. A ameaça decorre da presença dessas substâncias em solução presentes em água e solos contaminados que podem reagir com produtos hidratados da pasta de cimento gerando expansões no interior da matriz.

Os sulfatos são encontrados em solos e águas naturais ou industriais. Nos solos, como a argila, o sulfato verifica-se como forma de gipsita (ou gesso, $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) sob um percentual de 0,01 a 0,05%, o que corresponde a uma quantidade inofensiva ao concreto. Em águas subterrâneas, como lençóis freáticos, as maiores concentrações são de sulfatos de magnésio, sódio e potássio. Em terras agrícolas pode-se encontrar o sulfato de amônia. (BRANDÃO, 1998; MEHTA E MONTEIRO, 2014; RIBEIRO *et al.*, 2018).

A desagregação do compósito ocorre em função das tensões internas geradas pelos produtos expansivos, que conseqüentemente acarreta deformações, deslocamentos em diferentes partes da estrutura e fissuração, como é observado na Figura 10.

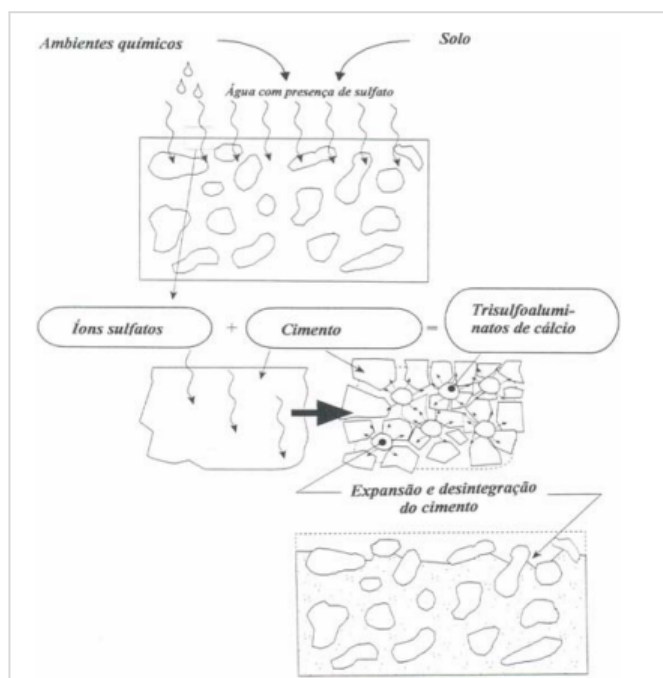
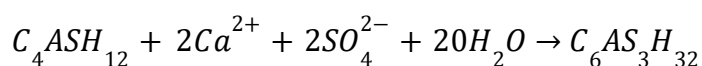


Figura 10 Processo de desintegração do concreto por ataque por sulfatos (Fonte: EMMONS, 1993)

De modo geral, o ataque dos sulfatos ocorre em três etapas. Na primeira ocorre a difusão dos íons agressivos para o interior da matriz. A segunda corresponde às reações químicas entre os íons sulfatos e certos compostos hidratados da pasta de cimento (Ca(OH)_2 , monossulfoaluminatos ou outros aluminatos hidratados) formando gipsita ou etringita que são produtos expansivos. A terceira está associada à fissuração da matriz gerada pela descalcificação do C-S-H causando perda de resistência e desintegração da matriz (SOUZA, 2006).

Ribeiro *et al.* (2018) classificou em quatro categorias as formas de ataque por sulfatos:

- a) *Forma clássica*: Está associada à formação da etringita ou gipsita. A etringita é formada pela reação de uma fonte externa de sulfato de cálcio ou sódio com o aluminato tricálcio (C_3A). Já a gipsita pode ser formada pela reação entre o sulfato de sódio ou magnésio com o hidróxido de cálcio ou silicato de cálcio hidratado (C-S-H).
- b) *Efeito físico*: Refere-se à cristalização dos sais de sulfato. Esse mecanismo não está associado à reação entre os compostos da matriz e os sulfatos. O efeito desse tipo de ataque é oriundo da ação física gerada pela expansão dos sais cristalizados no interior dos poros, causando a expansão da estrutura. Nesse fenômeno os sais sulfatos, em presença de água, penetram a matriz por permeabilidade, capilaridade ou difusão. A cristalização de sais pode ocorrer com o aumento da sua concentração ocasionado pela evaporação da água. Esses cristais ocupam volume maior do que em solução e por isso geram tensões no interior da matriz.
- c) *Ataque interno*: Associa-se a formação da etringita tardia, isto é, formada após o concreto endurecido que promove expansões e microfissuras, e conseqüentemente diminuindo a resistência mecânica da estrutura. Esse mecanismo ocorre quando há desproporção entre o teor de C_3A e gipsita na matriz, tendendo ao excesso do primeiro e formando monossulfato e aluminato de cálcio hidratado. Esses produtos podem reagir com o hidróxido de cálcio e os íons sulfato, produzindo a etringita tardia (trissulfoaluminato hidratado tardio) como mostra a equação:



- d) *Formação da taumasita*: Ocorre pelo ataque simultâneo de sulfatos e carbonatos em baixas temperaturas. Mesmo que com baixos teores de aluminatos, o uso de cimentos Portland resistentes a sulfatos não previne a formação da taumasita, já que neste caso os sulfatos atacam o C-S-H. Assim sendo, a formação da taumasita requer além da presença de sulfatos, a presença de cálcio e CO₂.

O efeito do ataque por sulfatos é extremamente agressivo uma vez que por causar expansão seguida de fissuração, funcionará como facilitador para a penetração de outros agentes deletérios. Este mecanismo assume, portanto, natureza mais mecânica do que eletroquímica, pois gera a formação de cristais de sulfoaluminatos de cálcio e sulfatos de cálcio que detêm elevada capacidade expansiva. Assim, ao fissurar, a permeabilidade da matriz aumenta, facilitando a entrada de outras substâncias agressivas acelerando o processo de deterioração da estrutura (RIBEIRO *et al.* 2018; BRANDÃO, 1998).

Na natureza existem diversos tipos de sulfatos (sulfato de magnésio, amônio, ferro, potássio, alumínio, cobre, etc.) que podem ser encontrados nas mais variadas fontes, sendo o sulfato de sódio um dos mais abundantes e nocivos. De acordo com Silva Filho (1994), esse composto é altamente agressivo, possui elevada solubilidade e pode ser encontrado na indústria química, leite e água do mar.

O ataque por sulfato de sódio (Na₂SO₄) ocorre através de duas reações principais. A primeira é entre o Na₂SO₄ e Ca(OH)₂ formando a gipsita. A segunda é a reação da gipsita com os aluminatos de cálcio hidratados formando a etringita.

Para mitigar este fenômeno, Emmons (1993) sugeriu o aumento de resistência do concreto por meio da redução do fator água/cimento, uso de cimento resistente à sulfatos, isto é, com baixo teor de aluminato tricálcio, e ainda com a introdução de adições pozolânicas, como sílica ativa e cinzas volantes.

A incorporação de adições minerais pode ser uma medida eficiente por consumir o hidróxido de cálcio livre na matriz, reduzindo a reserva alcalina disponível para reagir com os sulfatos, e ainda adensar a pasta de cimento, diminuindo a sua permeabilidade.

5. MATERIAIS E MÉTODOS

O fluxograma apresentado na Figura 11 descreve o programa experimental utilizado na caracterização dos compósitos.

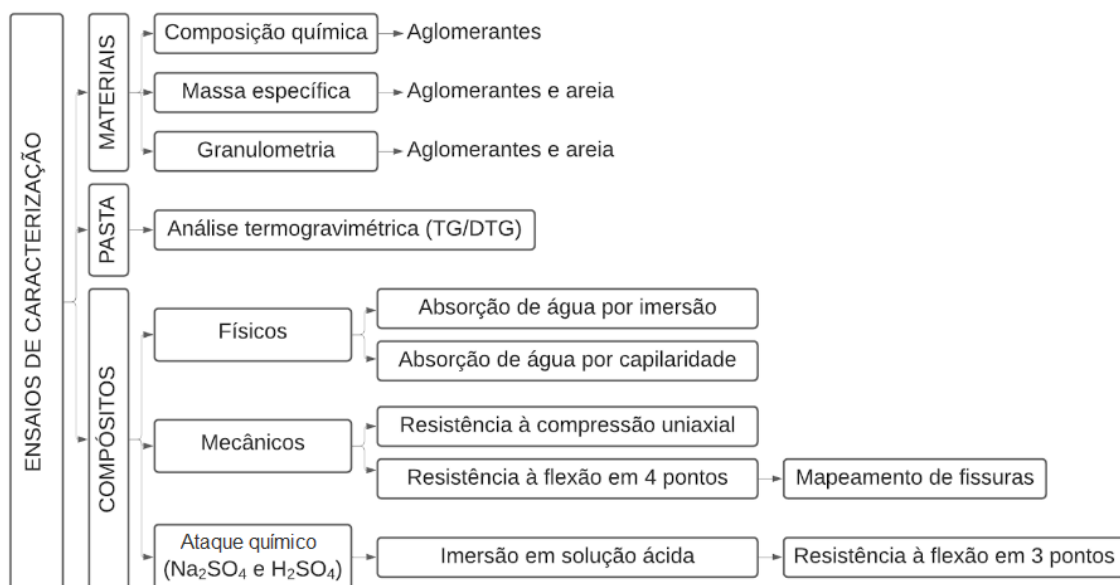


Figura 11 Fluxograma do programa experimental

1. 5.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

5.1.1 Fibras de sisal

As fibras de sisal utilizadas nesta pesquisa foram fornecidas pela Associação Brasileira de Desenvolvimento Sustentável e Solidário da Região Sisaleira (APAEB), proveniente do município de Valente, Bahia.

As fibras passaram por um processo de pré-tratamento em que foram imersas em água a uma temperatura de aproximadamente 50°C durante 1 hora com o intuito de retirar resíduos aderidos na sua superfície, como graxas e resinas naturais. Posteriormente, as fibras foram retiradas para secagem em temperatura ambiente.

Após devidamente lavadas e secas, as fibras foram escovadas para alinhamento através de uma prancha de madeira com pregos e cortadas manualmente com o uso de tesoura em comprimento de 40mm (Figura 12).



Figura 12 Alinhamento e corte das fibras. a) pente de pregos; b) fibras de sisal cortadas com 40mm de comprimento

5.1.1.1 Tratamento químico das fibras de sisal

O tratamento empregado nas fibras de sisal foi o tratamento alcalino à base de hidróxido de cálcio, conforme realizado por Santos (2020). Segundo Ferreira (2016), o objetivo do tratamento é potencializar a remoção da maioria das substâncias não celulósicas da superfície da fibra, aumentando a área de contato fibra-matriz, melhorando, portanto, a sua aderência. Este processo consistiu em imergir as fibras já cortadas em uma solução de hidróxido de cálcio – $\text{Ca}(\text{OH})_2$, a concentração de 0,73%, produzida em laboratório com água deionizada (Figura 13a). Após 50 minutos de imersão, as fibras foram retiradas, colocadas em peneiras para secagem ao ar livre (Figura 13b).



Figura 13 a) Lavagem alcalina das fibras de sisal; b) Secagem das fibras tratadas

5.1.1.2 Teor de umidade da fibra de sisal

O presente ensaio foi realizado nas fibras após realização do tratamento alcalino. Para definir o teor de umidade, três feixes de fibras com comprimento de 40mm e de mesma massa foram separados, fixando o valor massa seca ao ar igual a 2g (Figura 14).

As fibras foram secas em estufa a uma temperatura constante de 100°C. Pesagens foram feitas a cada 24 horas até que fosse atingida constância de massa, isto é, quando a diferença entre os valores obtidos nas duas últimas pesagens não exceda dez por cento.



Figura 14 Pesagem das fibras para ensaio de umidade

O teste foi realizado em triplicata e em condições de laboratório (T=23°C), a umidade da fibra foi expressa como diminuição em porcentagem de peso de acordo com a Equação 1.

$$\text{Teor de umidade (\%)} = \frac{P_f - P_i}{P_f} \times 100$$

Equação 1

Onde:

Pi: peso inicial (g);

Pf: peso final após secagem até constância de massa em estufa (g).

De acordo com os resultados obtidos, o teor de umidade das fibras de sisal utilizadas correspondeu a 13%.

5.1.2 Aglomerantes

Para a produção das matrizes e dos compósitos foram utilizados os seguintes aglomerantes: (i) Cimento Portland CPV ARI fabricado pela Holcim; (ii) Metacaulinita comercialmente vendida pela Metacaulim do Brasil Indústria e Comércio Ltda; (iii) Cinza de casca de arroz produzida pela Silcca Nobre SBI; (iv) Cinza volante produzida comercialmente pela Pozo Fly – Comércio de Cinzas Lima Ltda; (v) Sílica ativa produzida por Dow Corning Metais do Pará Indústria e Comércio Ltda.

5.1.2.1 Composição química

A determinação da composição química dos aglomerantes foi obtida com o auxílio de um espectrômetro de energia dispersiva de raios X (EDS), modelo EDX-720 da Shimadzu, com tubo de ródio e detector de silício-lítio (SiLi) resfriado por nitrogênio líquido do Laboratório de Estruturas e Materiais da COPPE/UFRJ. Os resultados são dados em percentuais dos óxidos, conforme Tabela 1.

Tabela 1 Composição química dos aglomerantes utilizados

	Cimento	Metacaulinita	Cinza de casca de arroz	Cinza Volante	Sílica ativa
CaO	68,970	-	0,781	1,940	0,520
SiO ₂	14,950	51,850	94,953	52,240	94,910
Al ₂ O ₃	4,700	41,690	-	33,800	1,910
SO ₃	4,290	1,090	1,255	1,790	1,590
Fe ₂ O ₃	3,500	1,910	0,072	4,910	0,100
K ₂ O	0,980	1,890	2,372	3,440	0,860
Outros componentes	0,574	0,015	0,553	0,103	0,053

5.1.2.2 Granulometria

A distribuição granulométrica dos aglomerantes foi determinada através do ensaio de granulometria a laser com a utilização do equipamento Malvern Mastersizer® 2000. Para a execução do ensaio, as amostras de cinza volante, cinza de casca de arroz, metacaulinita e sílica ativa foram dispersas em água deionizada. Já a amostra de cimento foi dispersa em álcool etílico por ser um material que possui um comportamento inerte em sua presença. A quantidade de material utilizado foi a necessária para atingir uma taxa de obscuração entre 10 e 20%, a velocidade de agitação foi de 1500 rpm e o tempo de dispersão de 5 min.

Na Figura 15 estão determinadas a granulometria dos aglomerantes.

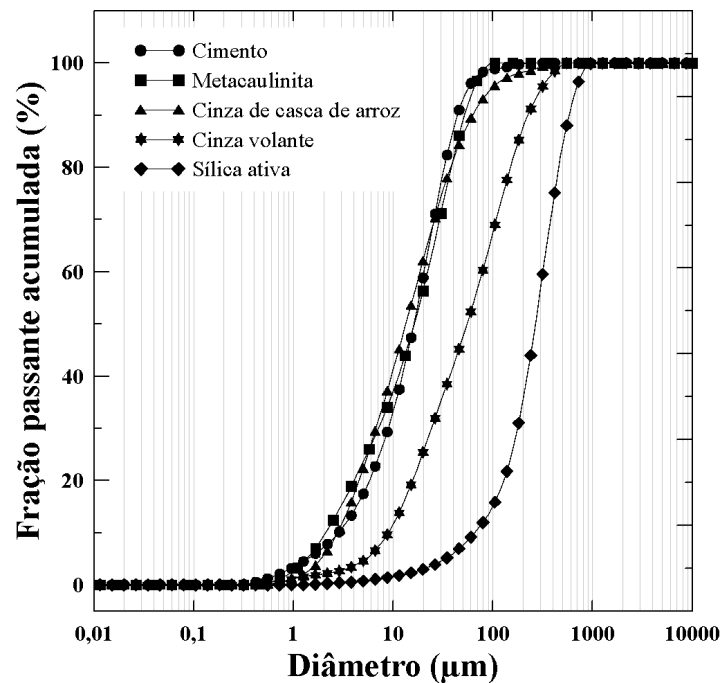


Figura 15 Curva granulométrica dos aglomerantes utilizados

De acordo com as curvas granulométricas, é possível observar que o diâmetro das partículas de cimento, cinza de casca de arroz e metacaulinita apresentaram valores médios semelhantes. Além disso, é possível observar que a sílica ativa apresentou um D50 maior do que todos os outros materiais conferindo a possibilidade de aglomeração, o que por sua vez indica a necessidade de um peneiramento prévio do material para melhorar a uniformidade do tamanho das partículas do material.

5.1.2.3 Massa específica

A massa específica dos aglomerantes foi determinada no picnômetro de gás hélio AccuPyc1340 marca Micromeritics® do Laboratório de Estruturas e Materiais da COPPE/UFRJ. O equipamento determina o volume real de um sólido e determina a massa específica realizada a partir de cinco leituras. A Tabela 2 apresenta os valores das massas específicas dos aglomerantes utilizados.

Tabela 2 Massa específica dos aglomerantes utilizados

Materiais	Massa específica g/cm³
Cimento	3,18
Metacaulinita	2,81
Cinza de casca de arroz	2,24
Cinza volante	2,16
Sílica ativa	2,39

5.1.3 Areia

Para a realização da presente pesquisa, foi utilizada uma areia de rio, com massa específica de 2,67g/cm³ e partículas menores de que 600 µm (ABNT Peneira 30).

5.1.3.1 Granulometria

A granulometria foi realizada em agitador mecânico de marca Mesh, em peneiras de abertura de (em mm): 0,600; 0,425; 0,300; 0,212; 0,150; 0,106; 0,075; 0,053. A curva da distribuição granulométrica do agregado miúdo é mostrada na Figura 16. Com diâmetro D_{máx} = 0,6 mm e módulo de finura MF = 1, sendo classificado como fino.

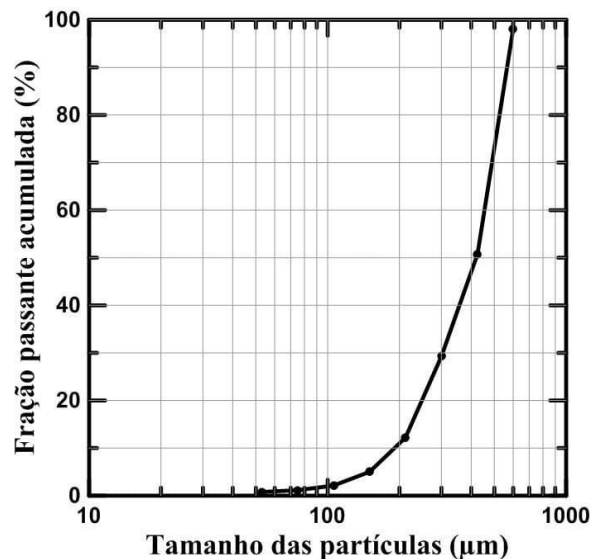


Figura 16 Curva granulométrica da areia utilizada

5.1.4 Água

A água utilizada em toda a fase experimental foi a proveniente da rede de abastecimento da cidade do Rio de Janeiro.

5.1.5 Aditivos químicos

O superplastificante utilizado foi o Master Glenium 51 comercializado pela BASF. A formulação é a base de éter policarboxilato e possui teor de sólidos de 31%. A massa específica é de 1,055 – 1,085 g/cm³ e pH entre 6 – 8 conforme informações fornecidas pelo fabricante.

O agente modificador de viscosidade foi o Rheomac UW 410 que consiste em um produto com base química de polímeros de celulose de alto peso molecular em forma de pó branco.

5.2 DOSAGEM E PRODUÇÃO DOS COMPÓSITOS

Tendo em vista a relação entre a melhoria da tenacidade e incorporação de fibras curtas de sisal com a utilização de 4% e 6%, em volume, foram produzidos compósitos com a incorporação dessas duas frações.

Os compósitos foram dosados com o intuito de obter uma matriz com baixo teor de hidróxido de cálcio, e por isso adições minerais foram usadas para evitar o processo de mineralização da fibra. Para isso, adotou-se como referência o compósito com 30%, em massa, de metacaulinita e 4% de fibras curtas de sisal (0,3MK4%) desenvolvido por Santos (2020), em função do melhor desempenho mecânico verificado quando comparado à compósitos com 100% de cimento Portland CPV ARI reforçados com fibra de sisal.

O segundo traço foi definido para avaliar o efeito do tipo de adição pozolânica. Para isso, manteve-se o volume de fibras e apenas substituiu-se o teor de metacaulinita pelo mesmo teor de cinza de casca de arroz (0,3CCA4%). Em seguida, foi testada a capacidade de melhoramento da tenacidade mantendo a composição da matriz e aumentando o teor de fibras para 6%, caracterizando o terceiro traço (0,3CCA6%).

Com o intuito de obter um compósito ainda mais ecoeficiente, testou-se avaliar uma matriz com um teor de CCA ainda maior. Para isso, retirou-se a sílica ativa e cinza volante para avaliar compósitos utilizando unicamente a cinza de casca de arroz como adição pozolânica incorporando teores de fibras iguais a 4% e 6%. Os compósitos foram identificados como 0,5CCA4% e 0,5CCA6%, respectivamente.

O teores de areia, água/aglomerante e cimento foram fixados, conforme descrito na Tabela 3 que apresenta o traço das misturas por ordem de moldagem.

Tabela 3 Identificação das misturas

Nomenclatura	CP	CCA	CV	SA	MK	Areia	a/ag	Fibra de sisal
0,3MK4%	0,5	0,0	0,1	0,1	0,3	1,0	0,5	0,04
0,3CCA4%	0,5	0,3	0,1	0,1	0,0	1,0	0,5	0,04
0,3CCA6%	0,5	0,3	0,1	0,1	0,0	1,0	0,5	0,06
0,5CCA4%	0,5	0,5	0,0	0,0	0,0	1,0	0,5	0,04
0,5CCA6%	0,5	0,5	0,0	0,0	0,0	1,0	0,5	0,06

CP: cimento Portland; CCA: cinza de casca de arroz; SA: sílica ativa; MK: metacaulinita

Quando utilizadas como reforço, as fibras podem causar segregação e perda de trabalhabilidade da mistura do compósito. Estes comportamentos podem ser corrigidos pela adição de um agente modificador de viscosidade (VMA) e incorporação de aditivo superplastificante (SP). No presente estudo, para todas as frações volumétricas de fibras, a quantidade de superplastificante utilizada foi de 1% e a quantidade de VMA necessária para manter a coesão foi de 0,05%, ambas calculadas sobre a massa de aglomerantes.

Na Tabela 4, encontra-se o consumo de material utilizado no presente estudo.

Tabela 4 Consumo de materiais para 1m³ de compósito

Misturas	Consumo (kg/m ³)									
	C	MK	CCA	CV	SA	A	H ₂ O	Fibra	SP	VMA
0,3MK4%	389,44	233,66	0,00	77,89	77,89	778,87	389,44	31,15	7,79	3,89
0,3CCA4%	381,41	0,00	228,85	76,28	76,28	762,83	381,41	30,51	7,63	3,81
0,3CCA6%	374,28	0,00	224,57	74,86	74,86	748,55	374,28	44,91	7,49	3,74
0,5CCA4%	381,11	0,00	381,11	0,00	0,00	762,22	381,11	30,49	7,62	3,81
0,5CCA6%	373,98	0,00	373,98	0,00	0,00	747,97	373,98	44,88	7,48	3,74

C: cimento, CCA: cinza de casca de arroz, CV: cinza volante, MK: metacaulinita, SA: sílica ativa, A: areia, SP: superplastificante.

Para a produção dos compósitos foi utilizado uma argamassadeira com capacidade de 20 litros. O processo de mistura adotado baseou-se no método utilizado por Santos (2020). Os materiais foram pesados e ensacados no dia anterior à moldagem, com exceção da água e dos aditivos químicos. Além disso, o aditivo superplastificante foi previamente diluído à água.

As etapas do procedimento de mistura foram:

- i. Mistura seca dos aglomerantes (1'30'')
- ii. Adição contínua de aproximadamente 2/3 da água com superplastificante (2'30'')
- iii. Pausa para retirada de material aderido na cuba (1')
- iv. Adição contínua de areia (2')
- v. Adição contínua de 1/6 de (30'')
- vi. Pausa para retirada de material aderido na cuba (1')
- vii. Incorporação de fibras durante tempo necessário para a sua dispersão à matriz (4' a 6')
- viii. Adição contínua de 1/6 de água restante (30'')
- ix. Adição de VMA
- x. Mistura por 30 segundos na velocidade 2 (220 RPM).

Exceto o item x, todas as etapas do processo produtivo foram executadas na velocidade 1 de 125 RPM e podem ser observados na Figura 17.

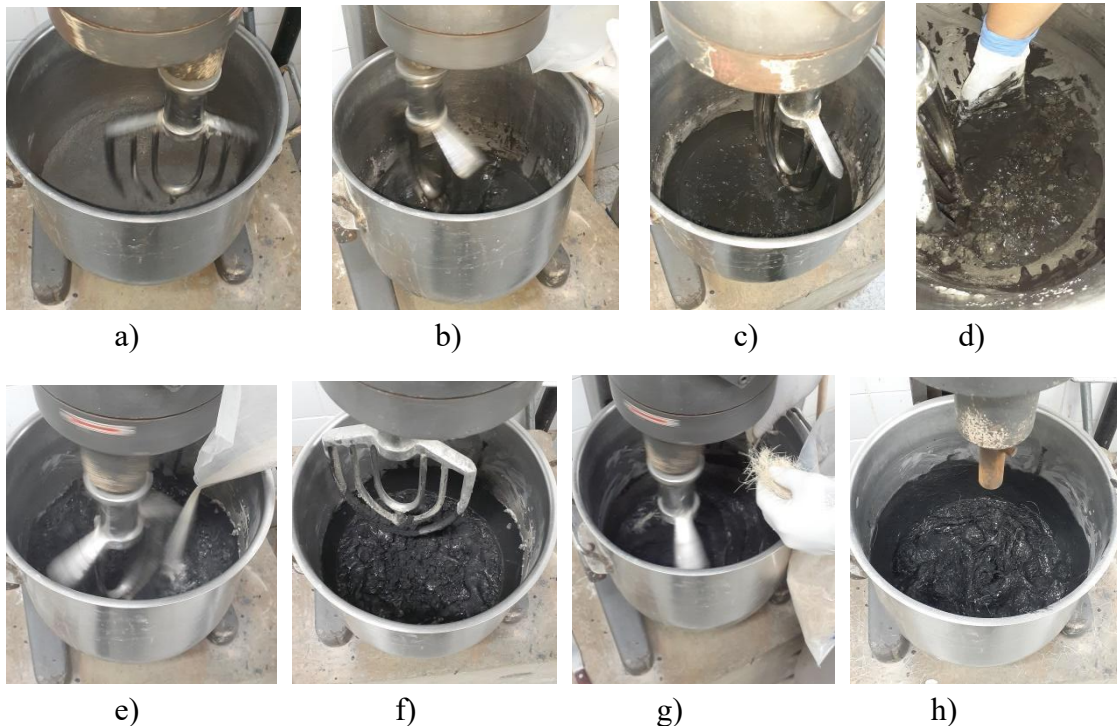


Figura 17 Sequência das etapas do procedimento de mistura. a) mistura seca dos aglomerantes; b) adição da água previamente misturada com superplastificante; c) aspecto da pasta; d) retirada de material aderido à cuba; e) adição de areia; f) aspecto da argamassa; g) adição de fibras; h) aspecto final da mistura

Foi verificado que ao substituir a metacaulinita pela cinza de casca de arroz, as misturas apresentaram um aspecto fortemente viscoso. Apesar disso, nenhuma apresentou segregação mostrando-se capaz de homogeneizar as duas frações de fibras de forma eficaz.

Os compósitos 0,3MK4% e 0,3CCA4% obtiveram espalhamentos iguais a 225mm e 202mm, respectivamente. Ao aumentar o teor de fibras, houve uma redução ainda maior, observada no compósito 0,3CCA6% com espalhamento igual a 193mm. Os compósitos com teor de CCA igual a 50%, 0,5CCA4% e 0,5CCA6%, apresentaram espalhamentos iguais a 205mm e 196mm, nesta ordem (Figura 18).



a) b) c) d) e)
Figura 18 Ensaio de espalhamento: a) 0,3MK4%, b) 0,3CCA4%, c) 0,3CCA6%, d)0,5CCA4%, e) 0,5CCA6%

A diminuição do espalhamento pode ser atribuída à substituição da metacaulinita pela cinza de casca de arroz. Além disso, os resultados obtidos apontaram que o aumento da fração volumétrica de fibras diminuiu o espalhamento.

Kannan e Ganesan (2014) avaliaram misturas com substituições parciais de cinza de casca de arroz e metacaulinita até 30%. Assim como no presente estudo, foi observado que a mistura com a presença de MK apresenta maior espalhamento quando comparada à mistura com CCA.

5.3 ANÁLISE TERMOGRAVIMÉTRICA DAS PASTAS (TG/DTG)

A técnica de termogravimetria (TGA) avalia a variação das propriedades físicas e químicas de uma substância em função da temperatura. O ensaio foi realizado aos 7 e 28 dias de idade. Para realizar a análise comparativa foram produzidas 3 pastas com a mesma relação água/aglomerantes dos compósitos produzidos (0,50) e sem a presença de aditivos químicos. São elas:

- Pasta 0,3MK: 50% de cimento + 30% de metacaulinita + 10% de sílica ativa + 10% de cinza volante + H₂O;
- Pasta 0,3CCA: 50% de cimento + 30% de cinza de casca de arroz + 10% de sílica ativa + 10% de cinza volante + H₂O;
- Pasta 0,5CCA: 50% de cimento + 50% de cinza de casca de arroz + H₂O.

A sala foi climatizada a 23°C (± 1°C) e foram produzidas amostras para as idades de 7 e 28 dias. Primeiramente foi executada a preparação das amostras com a pesagem dos materiais secos (Figura 19a) e moldagem das pastas (Figura 19b) que em seguida foram inseridas em sacos plásticos com o auxílio de uma espátula (Figura 19c). Os sacos foram identificados, zipados e vedados com três voltas de fita crepe (Figura 19d). Em seguida, as amostras foram mantidas em dessecador até a idade de ensaio (Figura 19e).

Para a execução do ensaio nas idades correspondentes, a vedação das embalagens plásticas foi retirada com auxílio de uma tesoura e as amostras foram quebradas em pedaços menores e maceradas com auxílio do almofariz.

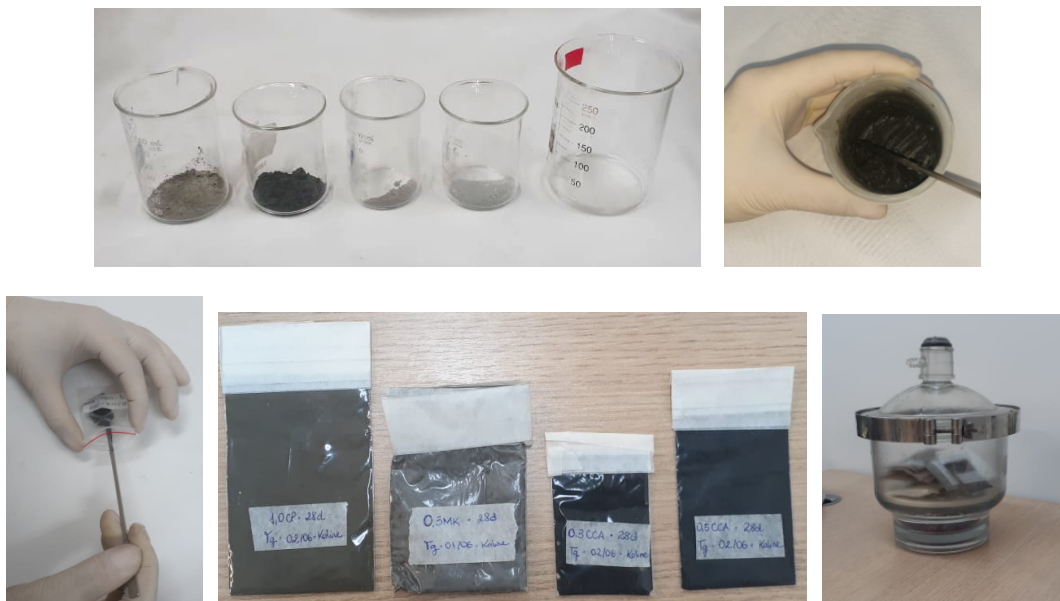


Figura 19 Etapas da preparação das amostras de análise térmica, a) pesagem dos aglomerantes; b) moldagem das pastas; c) pasta sendo inserida dentro do saco plástico com o auxílio de espátula; d) amostras identificadas e vedadas com fita crepe; e) amostras no dessecador

As análises termogravimétricas foram realizadas no equipamento modelo SDT Q600 TGA/DTA/DSC simultâneo da TA Instruments do Laboratório de Estruturas e Materiais da COPPE/UFRJ com uso de cadinho de platina (Figura 20). O equipamento operou com uma isoterma de 35°C por 1 hora, seguida por uma taxa de aquecimento de

10°C/min até a temperatura de 1000°C, a atmosfera foi de nitrogênio e vazão do gás de arraste de 100 mL/min.



Figura 20 Equipamento SDT Q600 TGA/DTA/DSC Simultâneo da TA Instruments.

A Figura 21 mostra um termograma típico com as curvas de perda de massa (TG) e a curva derivada da perda de massa (DTG). Na curva TG é possível identificar três perdas de massa consideradas significativas. A Perda de massa 1 é referente à desidratação da etringita (fase AFt), do silicato de cálcio hidratado (C-S-H) e das fases aluminatos compreendidas numa faixa de temperatura entre 50°C e 200°C. A Perda de massa 2 é atribuída à desidratação do CH e ocorre entre 380°C e 450°C. Já a Perda de massa 3 é caracterizada pela descarbonatação do carbonato de cálcio entre 600°C e 700°C. Com exceção do CH e CaCO₃, a perda de massa dos demais compostos hidratados ocorre em faixas de temperaturas semelhantes, dificultando a identificação de picos isolados na curva DTG e quantificação das fases (ROCHA, 2015).

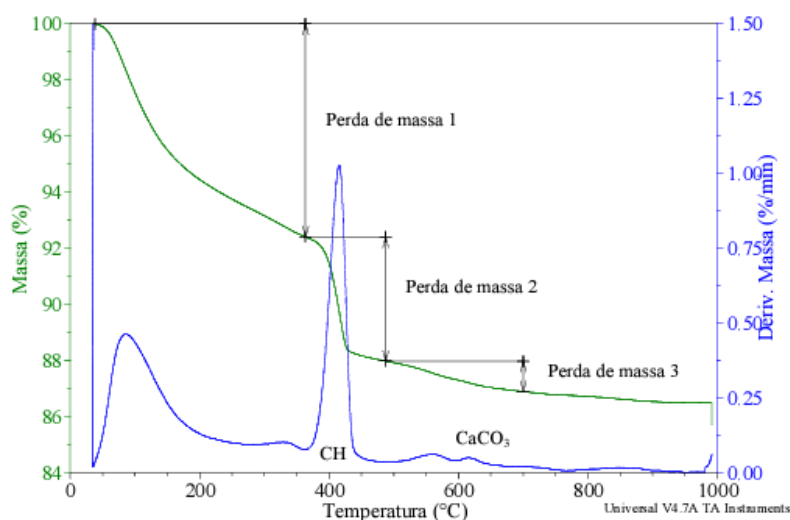


Figura 21 Curvas típicas de termogravimetria e termogravimetria diferencial para uma pasta de cimento Portland

Foi realizada uma análise quantitativa dos produtos presentes nas pastas de cimento em relação à massa calcinada, conforme descreve a Equação 2.1

$$Mbc = \frac{M_i}{M} \times 100 \quad \text{Equação 3.1}$$

Onde,

M_{bc} : % de massa na temperatura T em base calcinada

M_i : % de massa da amostra na temperatura T na base inicial

M: % de massa da amostra ao final do experimento

As perdas relativas à decomposição do hidróxido de cálcio e do carbonato de cálcio foram calculadas através das reações estequiométricas, conforme Equação 2.2 e Equação 2.3.



Perda de massa teórica = 24,32% da massa de $Ca(OH)_2$ na amostra.



Perda de massa teórica = 44,00% da massa de $CaCO_3$ na amostra.

Os valores serão apresentados na Tabela 5.

5.4 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DOS COMPÓSITOS

5.4.1 Absorção de água por imersão

O ensaio de absorção de água por imersão foi realizado seguindo as prescrições da norma NBR 9778 (ABNT, 2005) possibilitando a determinação do índice de vazios e massa específica dos compósitos. Para cada mistura foram moldados 4 corpos de prova cilíndricos de 75mm de diâmetro e 150mm de altura, que permaneceram em câmara úmida durante 28 dias de cura.

Após a cura, os corpos-de-prova foram inseridos em estufa à temperatura de 100°C até atingir constância de massa, isto é, quando a diferença entre duas pesagens sucessivas não excede 0,5% da menor massa. Em seguida, os corpos de prova foram imersos em água à temperatura ambiente (23°C) por um período de 72h e

posteriormente pesados em balança hidrostática (M_i) e em condição saturada superfície seca (M_{sat}). A Figura 22 apresenta as etapas do ensaio.

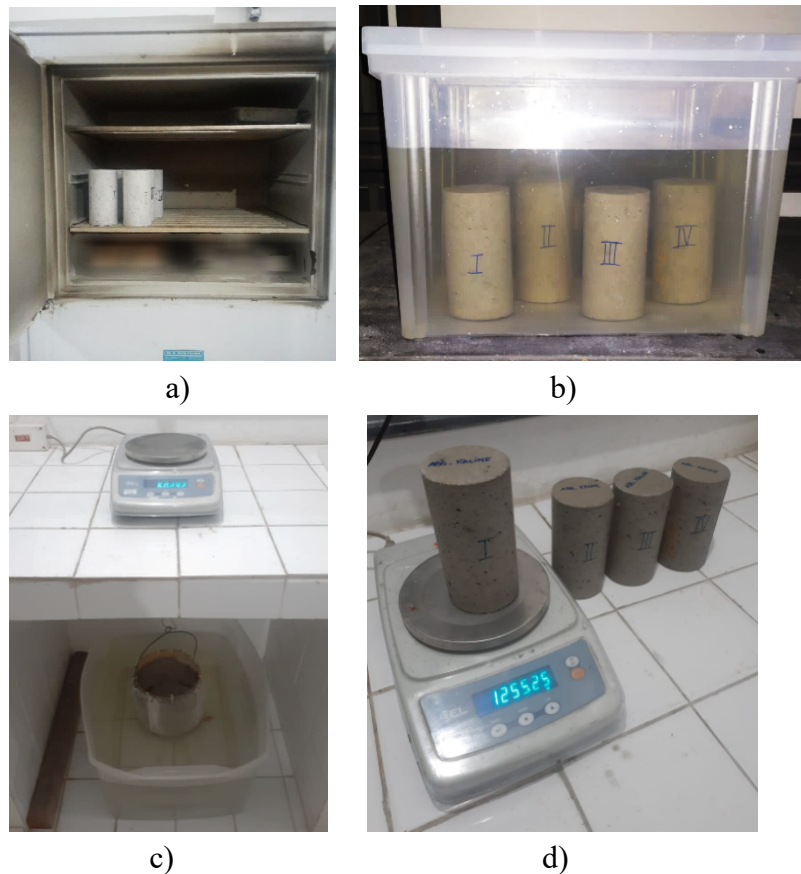


Figura 22 a) Secagem dos corpos de prova em estufa a 100°C; b) imersão em água de corpos de prova para saturação; c) pesagem do corpo de prova em balança hidrostática; d) pesagem dos corpos de prova na condição M_{sat}

Com dados obtidos, foram determinados os valores de absorção de água (A_t), índice de vazios (I_v) e massa específica (ρ_r) através das Equações 3.1, 3.2 e 3.3.

$$A_t = \frac{m_{sat} - m_s}{m_s} \quad \text{Equação 3.1}$$

$$I_v = \frac{m_{sat} - m_s}{m_{sat} - m_i} \quad \text{Equação 3.2}$$

$$\rho_r = \frac{m_{sat}}{m_{sat} - m_i} \quad \text{Equação 3.3}$$

Onde,

A_t : absorção total;

I_v : índice de vazios;

ρ_f : massa específica;

m_{sat} : massa saturada superfície seca do corpo-de-prova;

m_s : massa do corpo-de-prova seca em estufa;

m_i : massa do corpo-de-prova saturada imersa em água (balança hidrostática).

2. 5.4 CARACTERIZAÇÃO DOS COMPÓSITOS

5.4.2 Absorção de água por capilaridade

O ensaio de absorção de água por capilaridade foi executado conforme NBR 9779 (ABNT, 2012). Foram utilizados 4 corpos de prova cilíndricos com dimensões de 75mm de diâmetro por 150mm de altura por mistura após cura úmida de 28 dias. Com o objetivo de obter o ganho de massa pela penetração de água por ascensão capilar em função do tempo, os corpos de prova foram selados com plástico filme e fita de alumínio em sua face curva como mostra a Figura 23.

Depois de seladas as amostras foram posicionadas sobre uma grade em um recipiente com nível de água de 5 ± 1 mm acima da face inferior, sendo esse nível mantido constante ao longo de todo o ensaio. O procedimento garante o fluxo unidirecional da água e evita a perda de umidade das amostras.



Figura 23 Corpo de prova selados em ensaio de absorção por capilaridade

Os valores de absorção de água por capilaridade foram determinados a partir da Equação 4.

$$Ac = \frac{M - M_s}{S}$$

Equação 4

Onde,

Ac: absorção de água por capilaridade (g/cm^2);

M: massa do corpo de prova em contato com a água (g);

Ms: massa do corpo de prova ao atingir constância de massa (g);

S: área da seção transversal do corpo de prova (cm^2)

5.4.3 Resistência à compressão uniaxial

O ensaio de resistência à compressão uniaxial foi realizado na prensa Shimadzu® com capacidade e célula de carga de 1000kN a uma velocidade de deslocamento de 0,3mm/min. Foram moldados 4 corpos de prova cilíndricos de 75 mm de diâmetro por 150mm de altura por traço, com preenchimento de molde em três camadas e vibração mecânica durante 15 segundos (Figura 24).



Figura 24 Vibração mecânica dos corpos de prova cilíndricos

Após 28 dias de cura em câmara úmida, os corpos de prova foram faceados em torno mecânico para regularização das superfícies, garantindo a uniformidade da aplicação de carga nas superfícies do topo e base da amostra. A velocidade de carregamento foi de 0,3mm/min e os deslocamentos axiais foram medidos por dois transdutores elétricos (LVDTs) fixados na zona central do corpo de prova (Figura 25).

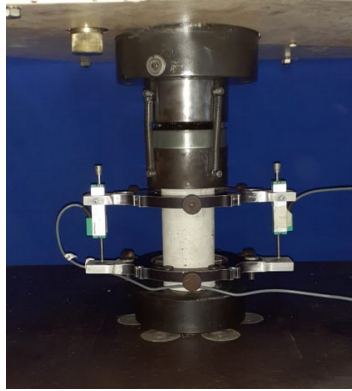


Figura 25 Posicionamento de LVDTs em ensaio de compressão axial

Através das curvas tensão x deformação obtidas por meio dos resultados do ensaio, determinou-se a resistência à compressão (f_c), tensão e deformação de primeira fissura e tenacidade calculado até o nível de deformação de $10000\mu\epsilon$. Ademais, o módulo de elasticidade foi calculado de acordo com a NBR 8522 (ABNT, 2021) pela Equação 4.

$$E = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\epsilon_2 - \epsilon_1} \quad \text{Equação 4}$$

Onde:

E: módulo de elasticidade;

σ_2 : tensão de compressão correspondente a 40% da carga última;

σ_1 : tensão de compressão correspondente à deformação axial (ϵ_1) de $5 \cdot 10^{-5}$;

ϵ_2 : deformação axial proveniente de σ_2 ;

ϵ_1 : deformação axial igual a $5 \cdot 10^{-5}$.

5.4.4 Resistência à flexão em 4 pontos

O ensaio de flexão em 4 pontos foi realizado na prensa Shimadzu® com capacidade e célula de carga de 100kN e controle de deslocamento de 0,3mm/min. Para a confecção dos corpos de prova foi moldada uma placa com dimensões de 500 x 400 x 15mm (largura x comprimento x altura) por traço, com preenchimento do molde em uma camada e vibração mecânica durante 15 segundos (Figura 26a).

Após cura úmida de 28 dias, a placa foi cortada para a obtenção dos corpos de prova de dimensões 80mm x 400mm x 15mm (largura x comprimento x altura). Antes da execução dos ensaios, foram feitas marcações para referenciar a posicionamento dos

corpos de prova na prensa e 1cm² de papel milimetrado foi colado no terço central da face inferior das amostras para viabilizar a análise de mapeamento de fissuras. A distância entre os apoios foi igual a 300mm e os pontos de aplicação de carga distam entre si de 100mm (Figura 26).

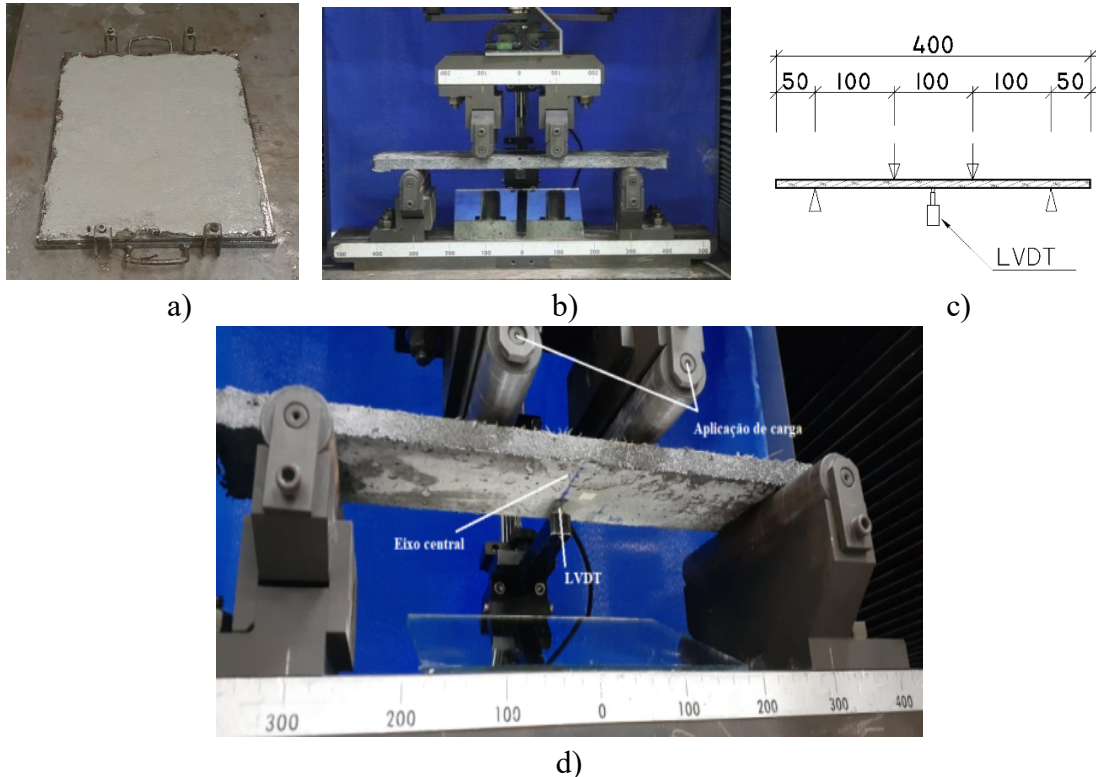


Figura 26 a) Moldagem de placa para ensaio de flexão em 4 pontos; b) Ensaio de resistência à flexão em 4 pontos; c) d) Esquema para execução de ensaio de flexão em 4 pontos

Para a realização do ensaio foi utilizado o software Trapezium para determinar a carga e a flecha no meio do vão através de um sensor da prensa e um LVDT acoplado ao dispositivo. A energia absorvida pelo corpo de prova equivale a área sob a curva do gráfico carga x deslocamento até uma deflexão de 15 mm. A tensão equivalente das curvas obtidas foi calculada utilizando a Equação 5. A espessura e largura adotadas foram as médias de três determinações aferidas no sentido longitudinal da placa e 80 mm para cada lado.

$$\sigma = \frac{6M}{bd^2} \quad \text{Equação 5}$$

Onde:

σ = tensão equivalente;

M = momento fletor;

b = largura do CP;

d = espessura do CP.

A avaliação do padrão de fissuração foi realizada através da análise de imagens obtidas a partir de diferentes estágios de deslocamento. Foi utilizado uma câmera digital CANON D90 com Lente Macro e resolução de 10 megapixels, que capturou imagens de alta resolução a cada 30 segundos. A partir das imagens foram medidas a formação, abertura, propagação e espaçamento de fissuras (Figura 27).

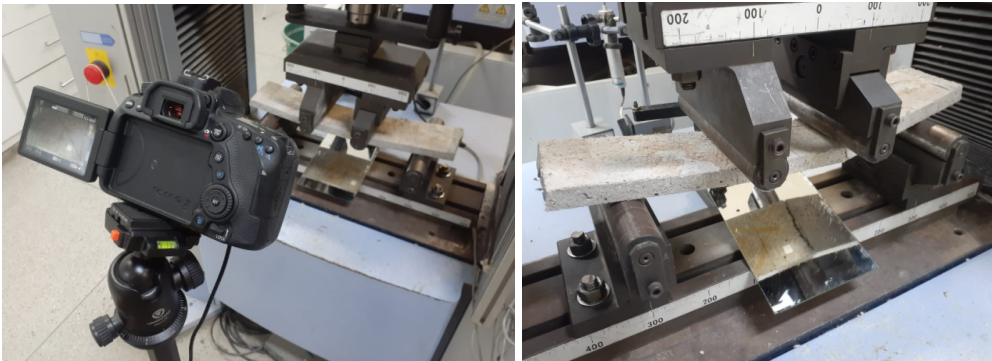


Figura 27 Sistema utilizado no registro do processo de fratura durante ensaio de flexão

O processamento das imagens foi realizado através do software *ImageJ*. Para quantificar as fissuras e calcular suas aberturas, foi utilizada a metodologia adotada por Ferreira (2012). A quantificação foi realizada a partir da identificação das fissuras que cruzassem três linhas paralelas de referência previamente traçadas em sentido transversal ao sentido das fissuras. Após quantificadas, foram realizadas as medidas das aberturas que interceptavam as linhas de referência. A abertura de cada fissura foi obtida a partir da média entre as três leituras efetuadas (Figura 28).

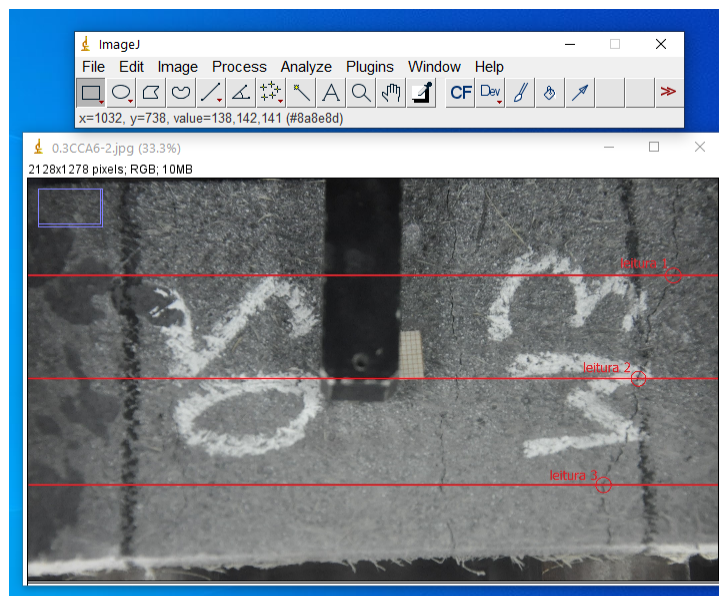


Figura 28 Medição da abertura de fissuras a partir das linhas de referência no software *ImageJ*

A densidade de fissuração foi obtida através da Equação 6:

$$d = \frac{n}{L} \quad \text{Equação 6}$$

Onde,

d = densidade de fissuração;

n = quantidade de fissuras;

L = comprimento da região de análise das fissuras (200mm).

5.4.5 Ataque de compósitos por ácido sulfúrico

O procedimento adotado para a simulação do ambiente agressivo baseou-se no método executado Paiva (2016). Após 28 dias de cura, os corpos de prova de cada mistura foram imersos em solução com 1% de ácido sulfúrico (concentração de 98%) para manter o pH da solução em $1 \pm 0,5$, que é representativo de ambientes agressivos e é utilizado por diversos laboratórios para o estudo de ataque em estruturas destinadas a esgotos. O volume de solução adotado foi $4 \pm 0,5$ vezes o volume dos corpos de prova dos compósitos.

A imersão em solução foi realizada utilizando recipientes plásticos de polipropileno devidamente vedados e com volume útil de 30 litros localizados em sala com ambiente controlado à temperatura de $22 \pm 1^\circ\text{C}$. As amostras foram dispostas na horizontal e espaçadas para que não tivessem contato entre si e nem nas superfícies do recipiente. Também foram utilizados anéis de tubo de pvc cortados com 5mm de altura colocados fundo do recipiente para apoiar os corpos de prova para que todas as superfícies das amostras permanecessem em contato com a solução.

Neste estudo foram confeccionados 3 corpos de prova por mistura e idade de ensaio, totalizando 9 corpos de prova prismáticos com dimensões de 160mm x 40mm x 40mm (comprimento x largura x altura).

O efeito do ataque ácido foi avaliado através de ensaios de resistência à flexão em 3 pontos, com base na norma NBR 13279 (ABNT, 2005). Após 28 dias em cura úmida, os corpos de prova foram ensaiados em 3 idades: antes do ataque (referência) e após 28 e 90 dias de imersão. Para o ensaio foi utilizada prensa servo-hidráulica Shimadzu de 100kN.

Ao fim de cada idade, 3 corpos de prova foram retirados da solução e o volume de solução era corrigido para manter a proporção do volume sólidos/solução de 1:4. Os

resultados de resistência à flexão em 3 pontos foram obtidos a partir das curvas de tensão x deformação.

Para este ensaio, o controle de deslocamento foi de 0,1mm/min e a distância entre os apoios foi de 100 mm, sendo o ponto de aplicação de carga localizado no eixo central transversal ao comprimento da amostra, conforme Figura 29.

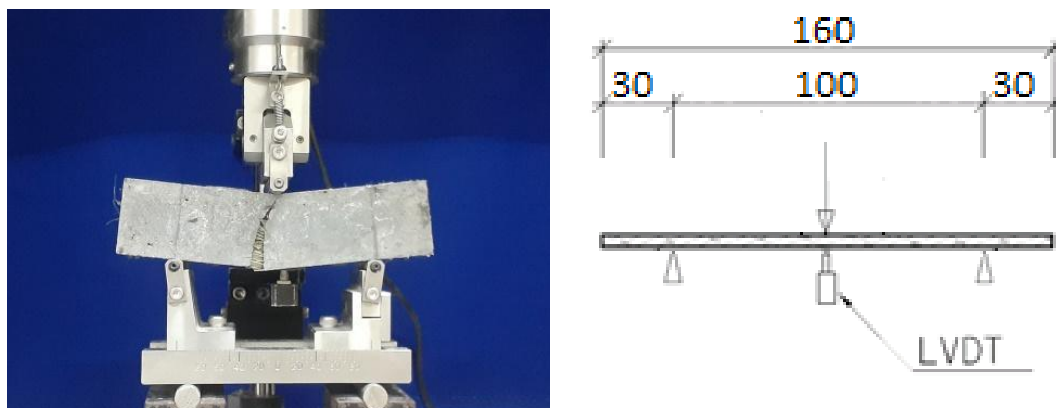


Figura 29 Esquema dos pontos de aplicação de carga em ensaio de resistência à flexão em 3 pontos

5.4.6 Ataque de compósitos por sulfato de sódio

As condições e procedimentos de exposição dos compósitos ao ataque por sulfatos foram realizados com base na ASTM C 1012 (2013) e ASTM C 267 (2001) conforme executado por Paiva (2016).

Para a realização do ensaio, foram produzidas soluções de sulfato de sódio anidro (Na_2SO_4) na proporção de 47g de Na_2SO_4 por litro de água (quantidade característica do material para 100% de solubilidade em água), sendo o volume de solução adotado de $4 \pm 0,5$ vezes o volume dos corpos de prova e pH compreendido entre 6 a 8.

Após 28 dias de cura os corpos de prova foram imersos na solução de sulfato de sódio, caracterizando a idade inicial de exposição na solução (referência).

Para este ensaio foram produzidos 3 corpos de prova por mistura para as idades de referência, 28 e 90 dias de imersão, totalizando 9 corpos de prova prismáticos por traço com dimensões de 160mm x 40mm x 40mm (comprimento x largura x altura). A troca de solução também foi corrigida ao fim de cada idade para a realização dos ensaios para atender à proporção sólidos/solução de 1:4. Os recipientes, pH-metro e condições ambientes laboratoriais foram os mesmos descritos anteriormente no processo de ataque por ácido sulfúrico (ver item 5.4.5).

Os ensaios de resistência à flexão em 3 pontos foram realizados seguindo os mesmos procedimentos descritos anteriormente para análise de ataque por ácido sulfúrico, bem como a idade de cura dos compósitos (ver item 1.8.2.1).

6. RESULTADOS E DISCUSSÕES

3. 6.1 ANÁLISE TERMOGRAVIMÉTRICA

A Figura 30 apresenta as curvas de termogravimetria (TG) e termogravimetria derivada (DTG) das pastas com idades de 7 e 28 dias. Na Tabela 5 são apresentados os valores de perda de massa em relação à base calcinada de cimento.

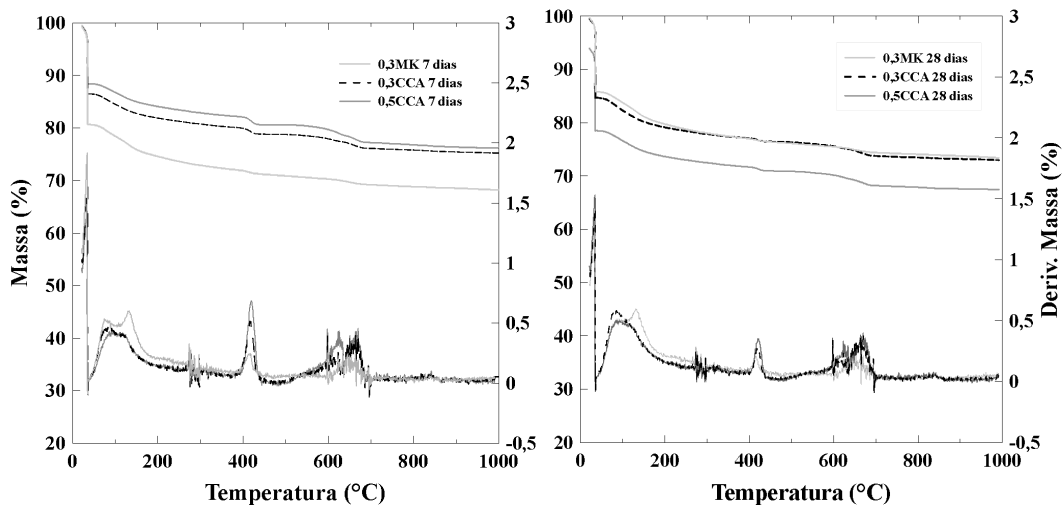


Figura 30 Curvas TG e DTG das pastas

Tabela 5 Percentuais de produtos hidratados da pasta de referência e da matriz calculados em base à massa calcinada do cimento

Idade	Pasta	H ₂ O combinad a total (%)	Ca(OH) ₂ (%)	CaCO ₃ (%)	Resíduo a 1000°C (%)
7 dias	0,3MK	8,780	1,314	1,536	68,22
	0,3CCA	6,031	1,728	2,401	75,23
	0,5CCA	5,620	2,138	3,207	76,21
28 dias	0,3MK	8,207	1,003	1,453	73,39
	0,3CCA	7,505	1,038	2,472	72,98
	0,5CCA	7,116	1,266	2,913	71,37

Como visto no item 1.7, a primeira perda de massa verificada nas curvas é atribuída à evaporação da água livre das amostras que ocorre no intervalo da isoterma de 35°C durante a primeira hora do ensaio. O segundo pico na DTG ocorreu devido à eliminação de água dos produtos hidratados, sendo eles a etringita (AFt), o silicato de cálcio hidratado (C-S-H) e fases aluminatos, para uma faixa de temperatura entre 50° e 200°C. Como essas perdas ocorrem em faixas praticamente sobrepostas, não é possível a identificação de cada um dos componentes através da técnica de análise térmica utilizada. Além disso, tanto aos 7 quanto aos 28 dias, à temperatura de aproximadamente 140°C, nas pastas contendo metacaulinita apareceu um ombro de forma mais acentuada em relação às pastas com cinza de casca de arroz, devido à desidratação do monosulfoaluminato (fase AFm). Entre 380°C e 450°C, ocorreu a desidroxilação do CH; e entre 600°C e 700°C, a descarbonatação do CaCO₃.

De acordo com a Tabela 5 os percentuais referentes à quantidade de água combinada foram maiores para a pasta com metacaulinita, o que sugere uma maior quantidade de silicatos, aluminatos e etringita para esta matriz em ambas as idades.

Os resultados apontam que a substituição da metacaulinita por cinza de casca de arroz apresentou para 7 dias maiores teores de hidróxido de cálcio. Enquanto isso, as matrizes contendo apenas CCA obtiveram os maiores teores de CH, o que pode estar associado à retirada de sílica ativa e cinza volante, gerando conseqüentemente um teor excedente de sílica responsável por aumentar a reserva alcalina.

A Figura 31 apresenta a evolução da perda de massa entre 7 e 28 dias de idade para cada pasta estudada. Durante o intervalo de tempo estudado, a sobreposição das curvas da pasta contendo metacaulinita mostra que não houve variação de massa expressiva, enquanto as pastas com cinza de casca de arroz mostraram uma diferença mais acentuada no segundo pico, com a diminuição da quantidade de AFt, C-S-H e AFm, e do terceiro pico com a diminuição do CH presente.

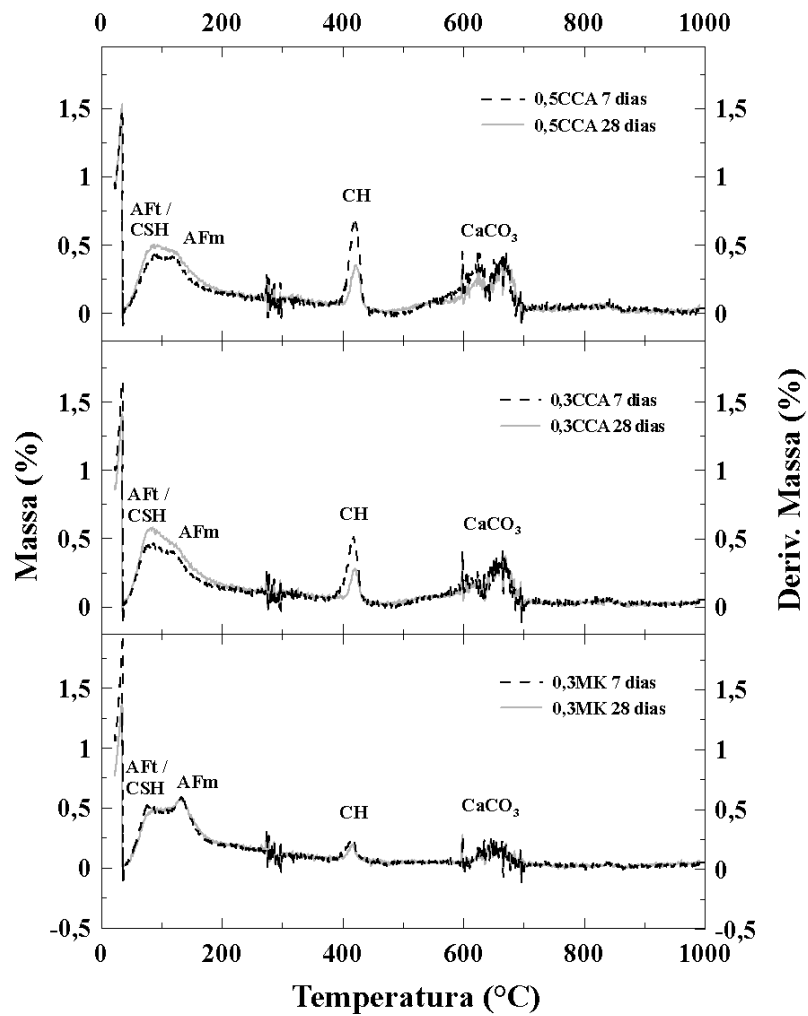


Figura 31 Evolução das curvas DTG aos 7 e 28 dias

6.2 PROPRIEDADES FÍSICAS DOS COMPÓSITOS

6.2.1 Absorção de água por imersão

Na Tabela 6 encontram-se os valores médios da absorção de água por imersão, do índice de vazios e da massa específica dos compósitos estudados e seus respectivos coeficientes de variação entre parênteses.

Tabela 6 Valores médios da absorção de água por imersão, índice de vazios e massa específica

Misturas	Absorção de água por imersão (%)	Índice de vazios (%)	Massa específica (kg/m ³)
0,3MK_4%	14,85 (5,55)	25,00 (4,60)	2245,71 (0,71)
0,3CCA_4%	18,58 (7,99)	29,84 (0,32)	2188,02 (0,08)
0,3CCA_6%	19,67 (0,52)	29,61 (0,31)	2138,12 (0,36)
0,5CCA_4%	18,01 (0,47)	29,46 (0,75)	2319,20 (0,62)
0,5CCA_6%	19,59 (12,62)	29,50 (5,72)	2281,14 (0,97)

Os resultados apontaram que a presença de metacaulinita proporcionou menor índice de vazios e capacidade de absorção de água. Este desempenho pode ser atribuído à formação de maior quantidade de produtos hidratados durante o período de hidratação estudado, o que diminui conseqüentemente a porosidade da matriz.

Em estudo desenvolvido por Kannan e Ganesan (2014), a metacaulinita e a cinza de casca de arroz apresentaram valores de área superficial obtidos pelo método de Blaine iguais a 2350m²/kg e 943m²/kg, respectivamente. Já o tamanho médio das partículas de MK foi de quase metade das partículas de CCA, sendo elas 3,79µm e 6,27µm, nesta ordem.

Como esperado, a incorporação de maior volume de fibras aumentou a absorção de água, o que pode estar relacionado à grande capacidade de absorção de água do reforço fibroso e ainda maior quantidade de zonas de interface fibra/matriz.

Notou-se ainda que a variação do teor de cinza de casca de arroz não provocou alterações no índice de vazios. Este comportamento pode estar associado à presença de sílica ativa que, assim como a cinza de casca de arroz, possui elevado teor de SiO₂ (Tabela 1), o que torna semelhante o teor de silicatos reativos entre as misturas com 30% e 50% de CCA.

A Figura 32 auxilia a visualização dos resultados de massa específica dos compósitos.

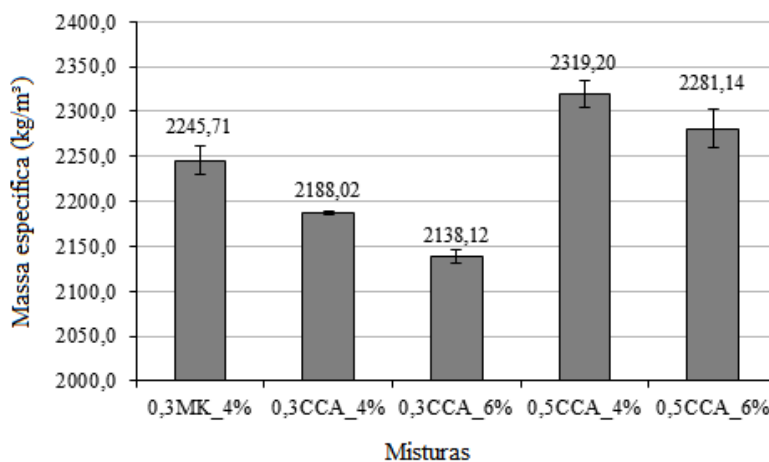


Figura 32 Massa específica das misturas aos 28 dias

É possível observar na Figura 32 que a substituição do teor de metacaulinita por cinza de casca de arroz proporcionou menor valor de massa específica. Os compósitos contendo unicamente cinza de casca de arroz como material suplementar obtiveram os maiores resultados de massa específica dentre os traços avaliados.

Além disso, foi verificado também que o aumento do volume de fibras diminuiu a massa específica nas duas composições de matrizes avaliadas que testaram ambas frações volumétricas. Sugere-se que este comportamento ocorra tanto devido à menor massa específica das fibras de sisal, quanto com a possível incorporação de ar aprisionado durante o processo de mistura em função da maior dificuldade de moldagem dos traços com maior volume de fibras.

De modo geral, a variação da massa específica foi influenciada predominantemente pela composição da matriz. É possível atribuir a maior densidade do compósito composto por metacaulinita tanto à sua maior massa específica em relação à cinza de casca de arroz (ver Tabela 2), quanto à possível formação de maior quantidade de C-S-H, que por sua vez possui maior densidade dentre os produtos hidratados.

6.2.2 Absorção de água por capilaridade

O ensaio de absorção permitiu a determinação do coeficiente de absorção de água por capilaridade após 72h de ensaio conforme estabelecido pela NBR 9779 (2012). Na Figura 33 estão apresentadas as curvas de absorção por capilaridade das misturas

estudadas. Na Tabela 7 constam os valores encontrados para a propriedade avaliada e seus respectivos coeficientes de variação entre parêntesis.

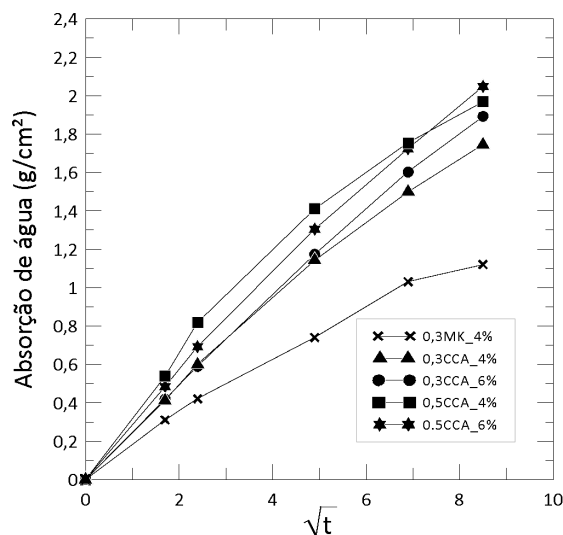


Figura 33 Curvas de absorção por capilaridade

Tabela 7 Resultados médios obtidos a partir do ensaio de absorção por capilaridade

Misturas	Absorção de água por capilaridade K (g/cm ²)
0,3MK_4%	1,12 (13,03)
0,3CCA4%	1,75 (5,63)
0,3CCA6%	1,89 (15,30)
0,5CCA4%	1,97 (17,46)
0,5CCA6%	2,05 (8,71)

Os resultados apresentados na Tabela 7 indicam que a matriz com metacaulinita apresentou menor capacidade de absorção de água por capilaridade dentre os todos os compósitos estudados. Foi verificado ainda que a substituição sílica ativa e cinza volante da matriz 0,3CCA por mais CCA, formando a matriz 0,5CCA, gerou um incremento nos coeficientes de capilaridade, o que pode estar relacionado com a maior massa específica verificada, como pode ser visto na Tabela 6.

De acordo com Ribeiro *et al.* (2018), maiores densidades são promovidas pelo maior grau de empacotamento das partículas, o que confere à matriz cimentícia uma rede de poros de menor diâmetro. Deste modo, a pressão exercida pelas paredes dos

poros capilares torna maior a capacidade de absorção de água por ascensão capilar do material.

A inserção de fibras aumentou de forma discreta a absorção de água por capilaridade dos compósitos. Para 72 horas de ensaio é possível concluir que todas as amostras tendem a continuar a ganhar massa. A presença do reforço poroso permite a continuidade da absorção capilar para ambos os volumes estudados.

6.3 PROPRIEDADES MECÂNICAS DOS COMPÓSITOS

6.3.1 Resistência à compressão axial

Os compósitos foram avaliados sob esforços de compressão após 7, 28 e 56 dias em cura úmida. A análise buscou comparar a influência da substituição da metacaulinita pela cinza de casca de arroz, o efeito da incorporação de cinza de casca de arroz como único material suplementar e avaliar o efeito da variação de fibras no desempenho dos compósitos estudados.

Na Figura 34 estão apresentadas as curvas de tensão x deformação típicas obtidas dos ensaios de resistência à compressão executados nas idades estudadas. Na Tabela 8 constam os resultados da tensão máxima e módulo de elasticidade (E), seguidos de seus respectivos coeficientes de variação entre parênteses.

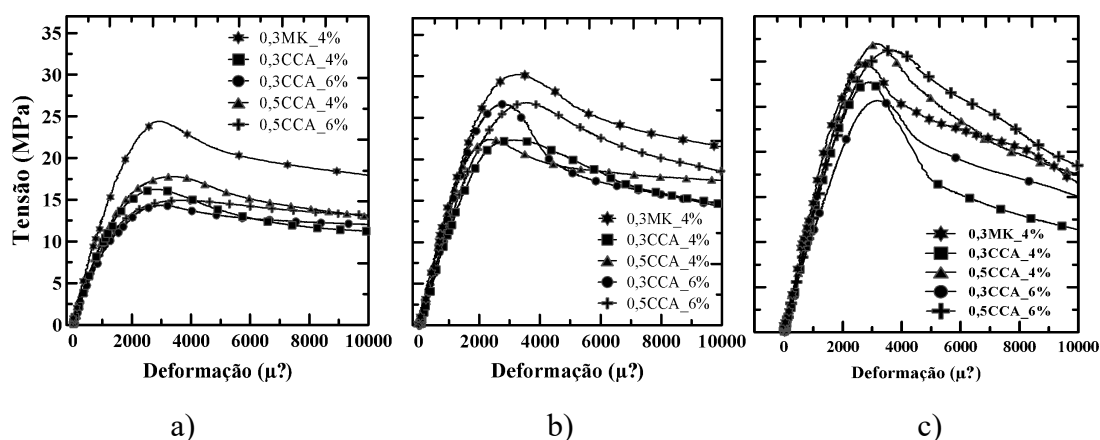


Figura 34 Curvas típicas tensão x deformação dos compósitos sob resistência à compressão axial: a) 7 dias; b) 28 dias; c) 56 dias

Tabela 8 Resistência à compressão e módulo de elasticidade dos compósitos

Misturas	Tensão máxima - MPa						Módulo de elasticidade - GPa					
	7 dias		28 dias		56 dias		7 dias		28 dias		56 dias	
0,3MK4%	24,10	(0,87)	29,12	(3,41)	30,30	(5,09)	13,41	(12,40)	15,34	(3,60)	15,80	(3,23)
0,3CCA4%	16,08	(1,44)	23,24	(5,02)	25,33	(10,22)	11,86	(1,44)	12,21	(0,11)	14,11	(10,75)
0,3CCA6%	14,45	(1,10)	25,55	(4,96)	27,69	(11,72)	10,32	(7,64)	11,94	(10,54)	14,02	(12,16)
0,5CCA4%	16,72	(8,93)	23,18	(4,47)	32,27	(9,20)	10,83	(3,34)	14,41	(6,36)	14,84	(11,36)
0,5CCA6%	14,69	(1,66)	25,25	(9,88)	31,64	(1,73)	9,91	(2,63)	13,11	(7,11)	13,68	(7,96)

A tenacidade (T_{28}) foi calculada aos 28 dias para valores de deformação de 10000 $\mu\epsilon$.

Tabela 9 Deformação de pico e tenacidade dos compósitos aos 28 dias

Misturas	Deformação de pico - $\mu\epsilon$	T_{28} - N/mm
0,3MK_4%	3413,96 (9,25)	31,51 (16,20)
0,3CCA_4%	2986,29 (8,78)	30,10 (6,09)
0,3CCA_6%	2994,66 (10,29)	38,70 (8,15)
0,5CCA_4%	2666,42 (8,70)	30,01 (10,68)
0,5CCA_6%	3276,28 (14,69)	34,49 (7,17)

Aos 7 dias, a metacaulinita contribuiu para os maiores valores de resistência com incremento de 37% em relação à cinza de casca de arroz. Observou-se ainda que o aumento da fração volumétrica de fibras em ambas as matrizes que contém cinza de casca de arroz diminuiu aproximadamente 11% a resistência à compressão. Esse comportamento está relacionado ao emaranhamento do reforço fibroso que diminui a dispersão da mistura e dificulta o seu processo, facilitando assim a incorporação de ar e resultando numa maior quantidade de poros à matriz (LIMA, 2004; FERREIRA, 2016; SANTOS, 2020).

Santos (2020) analisou a influência da variação do volume de 2%, 3% e 4% de fibras com três diferentes tipos de tratamentos e observou uma tendência na redução da resistência à compressão de todos os compósitos com o aumento da fração volumétrica de fibras, exceto para $vf=2\%$ que se manteve constante.

Aos 28 dias, a substituição da metacaulinita pela cinza de casca de arroz promoveu uma diminuição de 20% na resistência à compressão. Já o aumento do volume de fibras provocou um incremento na tensão de pico de 9% em ambas as matrizes, melhorando a capacidade de absorção de energia, e por conseguinte, aumentando a tenacidade dos compósitos conforme verificado na Tabela 9. Com exceção da matriz composta por metacaulinita, observou-se que composição da matriz não provocou alterações expressivas para os valores de tenacidade dos compósitos com 4% de fibras.

Aos 56 dias, o traço com MK se manteve apresentando maior resistência à compressão em relação ao traço com mesmo teor de CCA. As matrizes com 50% de cinza de casca de arroz apresentaram os valores de resistência à compressão mais elevados. O efeito da variação de fibras não provocou alteração significativa na resistência.

O módulo de elasticidade do compósito com metacaulinita foi superior nas três idades estudadas, sugerindo que a substituição pela cinza de casca de arroz diminuiu a rigidez da matriz na fase elástica. Quanto ao efeito do teor de fibras, os compósitos seguiram uma tendência semelhante nas três idades estudadas: um decréscimo para os teores mais elevados de fibras. O mesmo comportamento foi verificado por Ferreira (2012) que avaliou compósitos com 2%, 3% e 4% de fibras com 25mm e 50mm.

A partir da análise dos resultados encontrados neste estudo e no de diversos autores (KANNAN E GANESAN, 2014; HOPPE FILHO *et al.*, 2015; MOHSENI *et al.*, 2017), pode-se considerar que a metacaulinita contribui de forma mais expressiva para o ganho de resistência do que a cinza de casca de arroz para os teores testados. Este comportamento pode estar associado ao esgotamento da reserva alcalina devido à quantidade excedente de sílica nas matrizes contendo cinza de casca de arroz, o que limita a continuidade à produção de compostos hidratados imprescindíveis para o ganho de resistência do material. Hoppe Filho *et al.* (2015) verificou que a partir de ensaios de índice de atividade pozolânica, a cinza de casca de arroz apresentou a menor taxa de pozolanicidade em comparação à metacaulinita, apesar de ser capaz de fixar maior quantidade de cal.

Kannan e Ganesan (2014) obtiveram o mesmo comportamento ao avaliarem a resistência à compressão aos 28 dias de compósitos com substituição de até 30% de metacaulinita e cinza de casca de arroz. Para todos os percentuais, a presença de MK

melhorou a resistência, inclusive para o teor de 30% que apresentou resultado de aproximadamente 52 MPa em comparação à 37 Mpa da mistura com 30% de CCA.

Mohseni *et al.* (2017) analisaram propriedades mecânicas de argamassas com adição de metacaulinita e cinza de casca de arroz na mesma mistura aos 28 e 90 dias. Os teores de substituição parcial de cimento Portland por metacaulinita foram de 5%, 10% e 15%, e de cinza de casca de 10%, 20% e 30%. Os autores verificaram que ao aumentar o percentual de CCA para um teor fixo de MK, houve uma tendência de diminuição da resistência a compressão em ambas as idades, constatando um melhor desempenho da metacaulinita em relação à cinza de casca de arroz.

Hoppe Filho *et al.* (2015) avaliaram a atividade pozolânica de adições minerais através da resistência à compressão de argamassas contendo 10% de substituição parcial do cimento por metacaulim e cinza de casca de arroz. Os autores verificaram que o composto com metacaulinita apresentou a maior resistência à compressão (16,0 MPa, aos 7 dias) mesmo tendo menor proporção reativa pelas fases amorfas. Já a argamassa com cinza de casca de arroz apresentou a menor resistência à compressão, apesar de demandar a menor quantidade de água de mistura.

6.3.2 Resistência à flexão em 4 pontos

A Tabela 10 apresenta os resultados experimentais médios de tensão de primeira fissura (σ_{1f}), deflexão de primeira fissura (δ_{1f}), tensão máxima pós fissura (σ máx pós fissura), deflexão pós fissura (δ pós pico) e índice de tenacidade (IT) obtidos a partir da análise das curvas com seus respectivos coeficientes de variação entre parênteses. A tenacidade foi calculada a partir do gráfico força x deflexão central para valores de deflexão de 15mm aos 28 dias.

Tabela 10 Resultados experimentais do ensaio de flexão dos compósitos

Misturas	σ_{1f} - MPa	δ_{1f} - mm	σ máx pós fissura - MPa	δ pós fissura - mm	IT ₁₅ - N/mm
0,3MK4%	4,22 (5,58)	0,39 (8,87)	4,42 (5,88)	2,93 (9,23)	2,43 (8,72)
0,3CCA4%	4,00 (4,78)	0,66 (9,37)	4,10 (3,04)	2,30 (18,82)	1,62 (13,34)
0,3CCA6%	4,04 (5,45)	0,63 (27,46)	4,13 (6,16)	10,50 (17,13)	1,79 (13,49)
0,5CCA4%	5,11 (5,50)	0,86 (15,19)	4,89 (12,99)	4,84 (12,36)	2,06 (15,87)
0,5CCA6%	4,73 (3,51)	0,95 (13,88)	3,77 (16,50)	3,53 (16,27)	1,75 (14,73)

Na Figura 35 são apresentadas as curvas tensão versus deflexão central dos compósitos sob flexão em 4 pontos. Observa-se que todos os compósitos apresentaram um comportamento linear até a abertura da primeira fissura, seguido de um comportamento de múltipla fissuração.

Ao substituir 30% de metacaulinita por cinza de casca de arroz, foi observado perda de tensão de primeira fissura. Já dentre as misturas com 30% de CCA, notou-se que o aumento no teor de fibras não provocou alteração expressiva na tensão de primeira fissura. O aumento no teor de fibras diminuiu levemente a resistência apenas entre os compósitos com 50% de CCA.

Quanto ao comportamento pós-fissuração, para os compósitos com $v_f=4\%$ verificou-se a abertura de uma a duas fissuras após a ruptura. Com o aumento no volume de fibras para 6%, foi verificada uma expressiva melhora no desempenho do traço 0,3CCA6% devido ao surgimento de múltiplas fissuras. Já o compósito 0,5CCA6% mostrou uma tendência ao surgimento de apenas uma fissura após a ruptura, o que pode estar associado à rigidez da matriz.

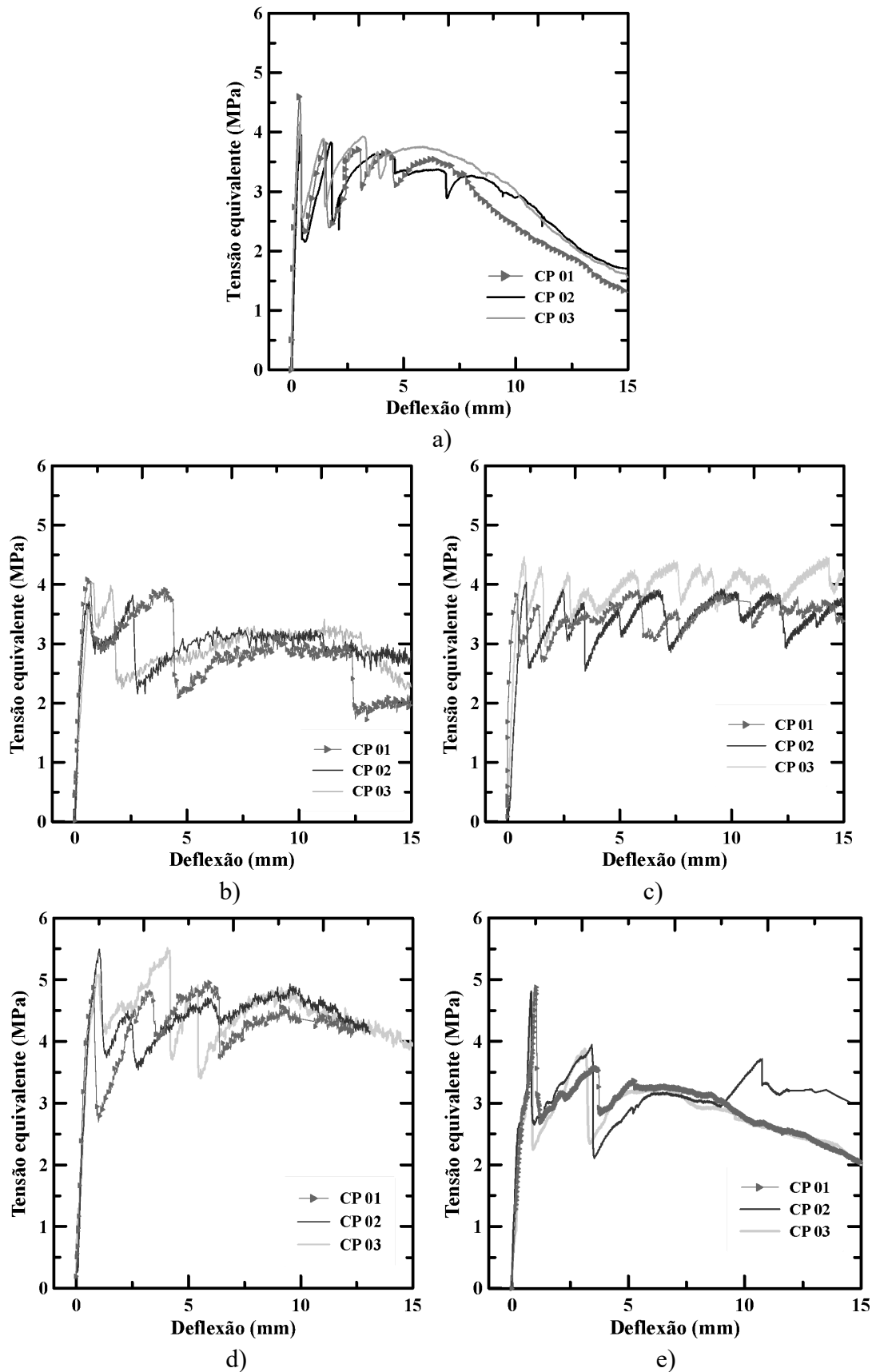


Figura 35 Curvas tensão x deformação dos compostos aos 28 dias. a) 0,3MK4%; b) 0,3CCA4%; c) 0,3CCA6%; d) 0,5CCA4%; e) 0,5CCA6%

A Figura 36 auxilia a visualização e o entendimento dos comportamentos a partir das curvas típicas das diferentes misturas.

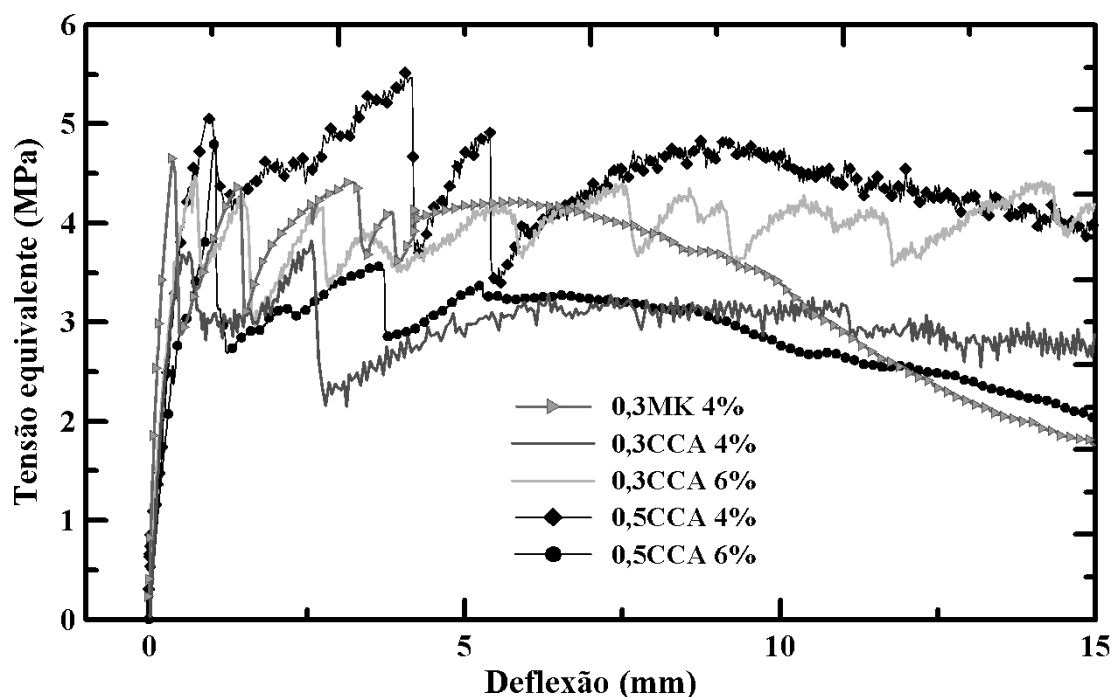


Figura 36 Curvas típicas tensão x deformação dos compósitos com frações volumétricas distintas e das fibras com tratamento.

Foi observado que a presença de adições rege o comportamento de tensão de primeira fissura, enquanto a incorporação de fibras tende a influenciar o comportamento pós-fissuração dos compósitos. As misturas com 50% de CCA apresentaram os maiores valores de tensão de primeira fissura. Já a variação da fração volumétrica de fibras não alterou o desempenho da fase elástica dos compósitos, mantendo, portanto, médias de tensões de pico similares.

Apesar de o melhor valor de tenacidade ter sido verificado para a matriz com 50% de CCA, possivelmente pelos valores mais expressivos de tensões de primeira fissura, a mistura 0,3CCA6% apresentou melhor desempenho devido à recuperação provocada pela grande quantidade de fissuras e manutenção da carga numa média constante.

Wei e Meyer (2016) estudaram o efeito da substituição parcial do cimento por cinza de casca de arroz e por metacaulinita sobre a mitigação da degradação de fibras de sisal através da resistência à compressão e flexão quatro pontos. Os autores concluíram que o teor ótimo de substituição para CCA foi de 20%, não verificando nenhum benefício adicional acima deste teor. Contudo, após ciclos de envelhecimento, os

resultados de resistência à flexão foram melhores para o teor de substituição de 30% de CCA, percentual este utilizado no presente estudo. Vale ressaltar que os autores não testaram maiores teores. Além disso, também foram encontrados melhores valores de resistência à flexão para 30% de CCA em relação ao compósito com substituição de 30% de metacaulinita, onde a resistência de primeira fissura foi 22% maior. Sugere-se que a otimização das propriedades mecânicas esteja associada ao ganho de rigidez da matriz em função das reações pozolânicas entre o CCA e o CP que aumenta a quantidade de C-S-H secundário, e ainda à melhoria das propriedades de ligação e diminuição da zona de interface fibra/matriz.

Já em termos de comportamento pós fissuração, Wei e Meyer (2016) observaram um desempenho considerável com a incorporação de metacaulinita, uma vez que a tenacidade foi melhorada em 107% em relação ao compósito com cinza de casca de arroz. Este comportamento pode ser atribuído às diferentes composições químicas entre as duas adições.

6.3.3 Modo de ruptura dos compósitos sob esforços de flexão

A análise do modo de ruptura foi realizada por meio de cálculos da abertura e espaçamento de fissuras, assim como densidade de fissuração das amostras submetidas a esforços de flexão. A abertura de fissuras, densidade e espaçamento de fissuração foi calculada em função da deflexão central em uma amostra de cada traço (Tabela 11).

O modo de ruptura dos compósitos ocorreu por meio de fissuras essencialmente paralelas e transversais que se abriram na região do terço central da face inferior do compósito, como é possível observar nas sequências de imagens da Figura 37.

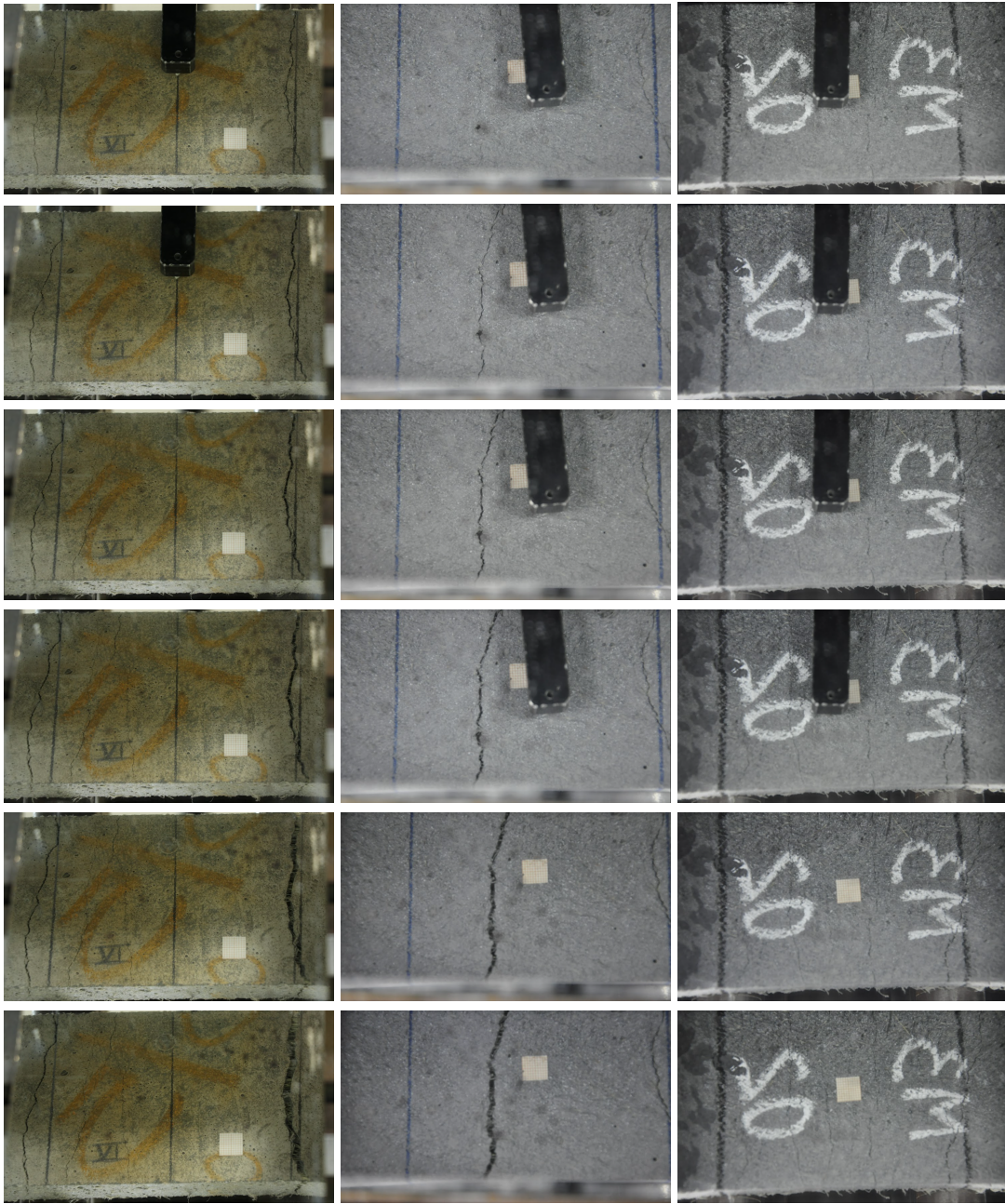
Tabela 11 Cálculo de densidade, espaçamento e abertura total de fissuras

Mistura	Deflexão (mm)	Fissuras(f)	Densidade de fissura (f/mm)	Espaçamento (mm)	Abertura total (mm)
0,3MK4%	4,00	2	0,008	249,23	0,77
	6,00	2	0,008	198,73	1,27
	8,00	3	0,012	99,01	1,98
	10,00	4	0,016	65,79	2,63
	12,00	4	0,016	65,50	3,49
	14,00	4	0,016	65,12	4,63

0,3CCA4%	4,00	2	0,008	249,31	0,69
	6,00	2	0,008	198,99	1,01
	8,00	2	0,008	198,98	1,02
	10,00	2	0,008	198,72	1,28
	12,00	2	0,008	197,75	2,25
	14,00	2	0,008	197,07	2,93
0,3CCA6%	4,00	2	0,008	249,42	0,58
	6,00	3	0,012	99,50	1,00
	8,00	4	0,016	66,15	1,50
	10,00	4	0,016	66,16	1,52
	12,00	4	0,016	65,95	2,14
	14,00	6	0,024	39,45	2,74
0,5CCA4%	4,00	1	0,004	0,00	0,45
	6,00	2	0,008	198,99	1,01
	8,00	3	0,012	99,33	1,35
	10,00	3	0,012	99,14	1,73
	12,00	3	0,012	99,07	1,87
	14,00	3	0,012	99,03	1,94
0,5CCA6%	4,00	1	0,004	0,00	0,47
	6,00	2	0,008	199,09	0,91
	8,00	3	0,012	99,41	1,19
	10,00	3	0,012	99,21	1,58
	12,00	3	0,012	98,97	2,06
	14,00	3	0,012	98,60	2,80

De acordo com a Tabela 11, nota-se uma constância na densidade de fissuração da matriz com 30% de CCA e $v_f=4\%$ o que está atribuído a não ocorrência de novas fissuras a partir de aproximadamente 3mm de deflexão. Após este ponto, a sequência de imagens da Figura 38 mostra que as fissuras existentes continuam a abrir, provocando uma queda na curva tensão x deformação (ver Figura 35b), o que condiz com a incapacidade do material em continuar suportando maiores cargas. Com o aumento do volume de fibras para 6%, foi verificado maior quantidade de fissuras e consequente aumento de densidade e diminuição do espaçamento. O material manteve constante a sua capacidade de suportar carga devido ao surgimento contínuo de fissuras e manutenção da variação de carga pós-fissuração até o intervalo de deflexão analisado.

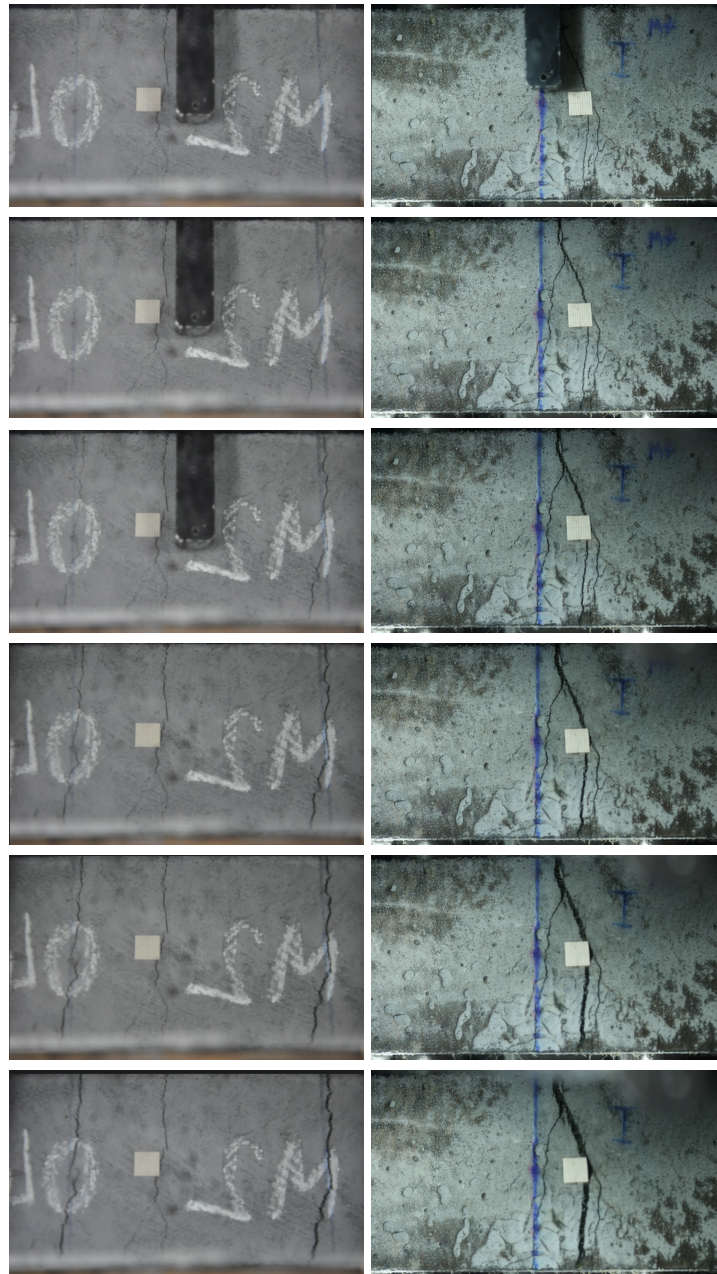
Nas matrizes com 50% de CCA, a variação do teor de fibras não influenciou expressivamente o comportamento dos compósitos sob flexão, pois a quantidade de fissuras entre as amostras de ambos os volumes foi similar, variando entre 2 e 3 unidades



a) 0,3MK4%

b) 0,3CCA4%

c) 0,3CCA6%



d) 0,5CCA4%

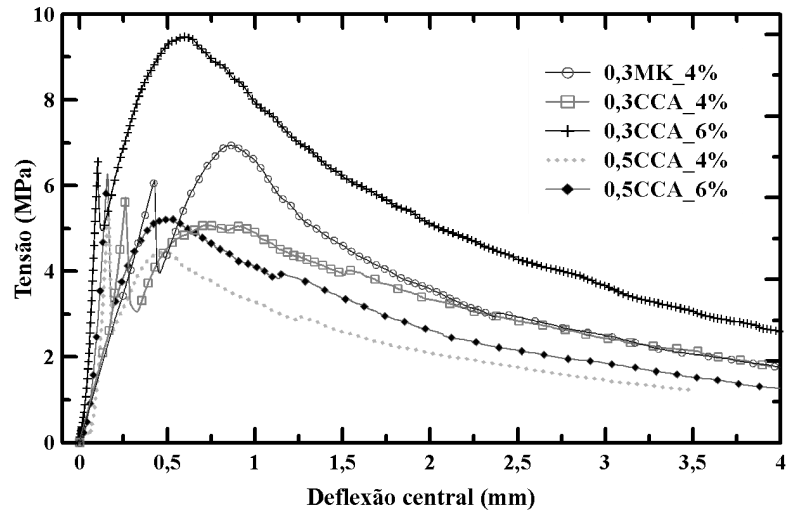
e) 0,5CCA6%

Figura 37 Processo de fratura típico dos compósitos com 30% de metacaulinita e cinza de casca de arroz e volume de fibras iguais a 4% e 6% durante os ensaios de flexão

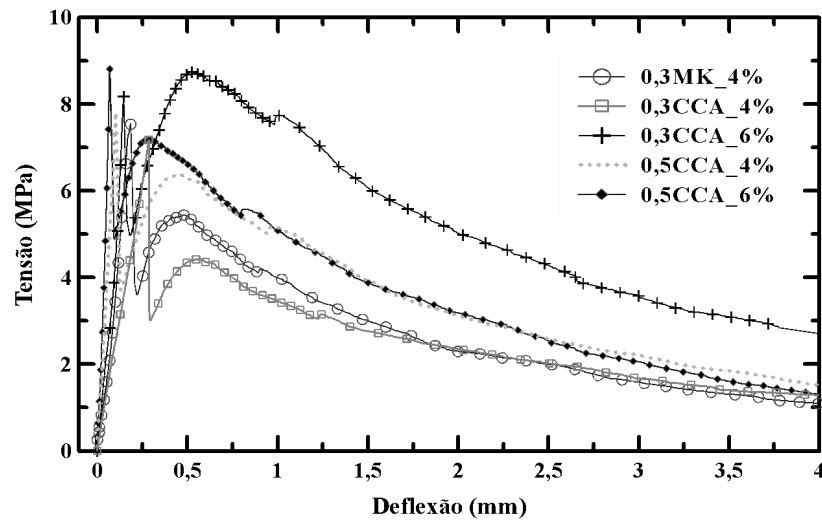
6.4 ATAQUE POR SULFATO DE SÓDIO

Os compósitos foram avaliados sob esforços de flexão em 3 pontos antes de imersão em solução ácida (referência) e após 28 e 90 dias de imersão. A análise buscou estudar o efeito da substituição da metacaulinita pela cinza de casca de arroz, bem como o efeito da retirada de sílica ativa e cinza volante para a incorporação de CCA como única adição pozolânica e variação da fração volumétrica de fibras.

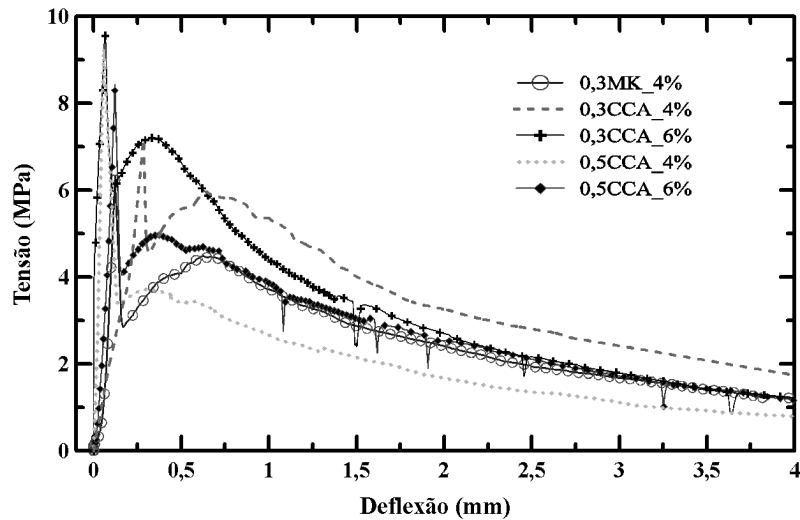
Na Figura 38 estão apresentadas as curvas de tensão x deformação típicas de referência (Figura 38a), aos 28 dias (Figura 38b) e após 90 dias de imersão (Figura 38c).



a)



b)



c)

Figura 38 Curvas típicas tensão x deformação dos compósitos sob resistência à flexão em 3 pontos em imersão em solução de sulfato de sódio. a) referência; b) 28 dias; c) 90 dias.

A Tabela 12 apresenta os resultados experimentais médios de tensão de primeira físsura (σ_{1f}) e tensão máxima pós ruptura ($\delta_{\text{máx-pós-1f}}$) com suas respectivas deflexões equivalentes, e índice de tenacidade (T_4) obtidos a partir da análise das curvas acompanhados dos seus coeficientes de variação entre parênteses. A tenacidade foi calculada a partir do gráfico força x deflexão central para valores de deflexão de 4mm.

Tabela 12 Resistência à flexão em 3 pontos e índice de tenacidade dos compósitos sob ataque por sulfato de sódio (coeficiente de variação em %)

Mistura	Idade	σ_{1f} (CV)	δ_{1f} (CV)	$\sigma_{\text{máx-pós-1f}}$ (CV)	$\delta_{\text{máx-pós-1f}}$ (CV)	T_4 (CV)
		MPa (%)	mm (%)	MPa (%)	mm (%)	N/mm (%)
0,3MK4%	REF	5,99 (13,74)	0,17 (2,69)	6,40 (12,17)	0,92 (59,38)	1,10 (11,91)
0,3MK4%	28 dias	7,68 (4,73)	0,22 (19,37)	5,19 (3,68)	0,50 (16,26)	0,89 (7,03)
0,3MK4%	90 dias	6,69 (7,76)	0,13 (6,36)	4,42 (27,31)	0,54 (20,95)	0,71 (27,79)
0,3CCA4%	REF	5,98 (6,18)	0,44 (8,81)	5,34 (5,02)	0,81 (29,31)	1,13 (4,85)
0,3CCA4%	28 dias	7,38 (13,22)	0,14 (9,41)	4,46 (11,59)	0,41 (22,26)	0,87 (12,82)
0,3CCA4%	90 dias	6,88 (5,96)	0,29 (3,87)	5,20 (12,81)	0,59 (8,67)	1,02 (12,69)
0,3CCA6%	REF	6,66 (6,80)	0,13 (28,87)	8,23 (17,53)	0,79 (48,96)	1,68 (10,26)
0,3CCA6%	28 dias	8,39 (6,28)	0,15 (6,31)	8,37 (7,08)	0,58 (12,32)	1,38 (26,62)

0,3CCA6%	90 dias	8,92 (6,72)	0,17 (37,33)	6,71 (13,49)	0,47 (42,12)	1,15 (10,19)
0,5CCA4%	REF	5,36 (10,24)	0,14 (13,95)	4,94 (8,32)	0,50 (8,36)	0,83 (11,75)
0,5CCA4%	28 dias	7,72 (14,89)	0,12 (18,39)	5,44 (15,51)	0,45 (16,34)	1,04 (17,26)
0,5CCA4%	90 dias	7,82 (14,55)	0,08 (23,97)	4,50 (22,01)	0,37 (14,85)	0,73 (12,03)
0,5CCA6%	REF	5,74 (7,07)	0,17 (7,53)	5,47 (21,12)	0,87 (56,89)	1,03 (13,59)
0,5CCA6%	28 dias	7,79 (12,65)	0,16 (10,65)	6,95 (7,38)	0,47 (7,69)	1,05 (15,82)
0,5CCA6%	90 dias	8,13 (5,92)	0,13 (12,52)	5,31 (5,77)	0,47 (22,18)	1,09 (13,77)

A partir dos resultados encontrados, observou-se que a substituição de metacaulinita por cinza de casca de arroz não alterou a tensão de primeira fissura, no entanto, o comportamento durante a fase elástica apresentou uma tendência à menor deformação. Os compósitos com maior volume de fibras verificaram maiores resistências de primeira fissura.

A Figura 39 ilustra a evolução da resistência à flexão em 3 pontos antes da imersão e após 28 e 90 dias dos compósitos imersos em solução agressiva em função dos teores de adições estudados.

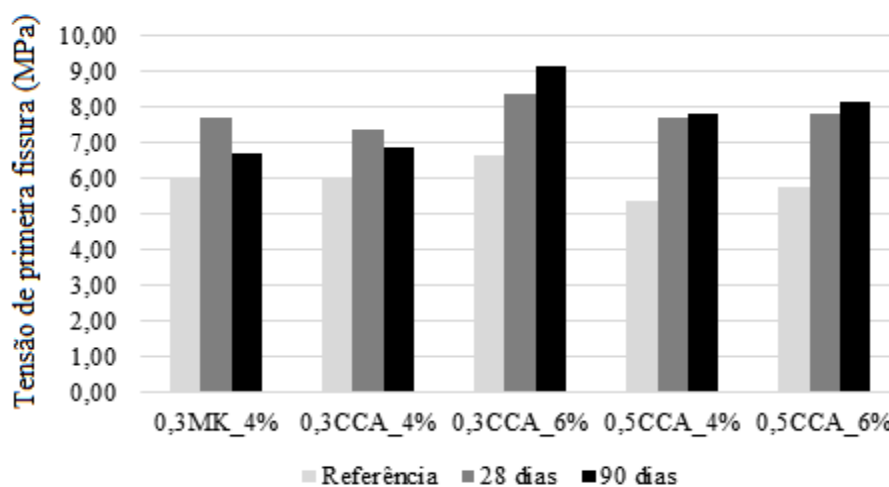


Figura 39 Evolução da tensão de primeira fissura nos ensaios de resistência à flexão em 3 pontos sob ataque por sulfato de sódio

A substituição da metacaulinita pela cinza de casca de arroz verificou o mesmo padrão de comportamento em ambas as idades de exposição. O efeito do aumento do volume de fibras foi mais evidente entre os compósitos com 30% de cinza de casca de

arroz. Foi observado que nos compósitos contendo 50% de cinza de casca de arroz, a evolução do ganho de resistência à primeira fissura foi maior em relação aos demais compósitos, no entanto, entre 28 e 90 dias não houve um ganho expressivo. Aos 90 dias, o ganho da capacidade resistente se manteve apenas para o compósito 0,3CCA6%.

A degradação mais expressiva ocorreu para a amostra com metacaulinita com uma queda de aproximadamente 13% da tensão de ruptura aos 90 dias, no entanto não houve perda de resistência à flexão do material em relação à resistência inicial.

O ganho de resistência até os 28 dias, seguido de uma queda de tensão provavelmente está atribuído ao processo de tamponamento de poros e densificação da matriz devido à formação de produtos expansivos como a etringita (TANG *et al.* 2015; LEE *et al.*, 2005; AL-AMOUDI, 1998).

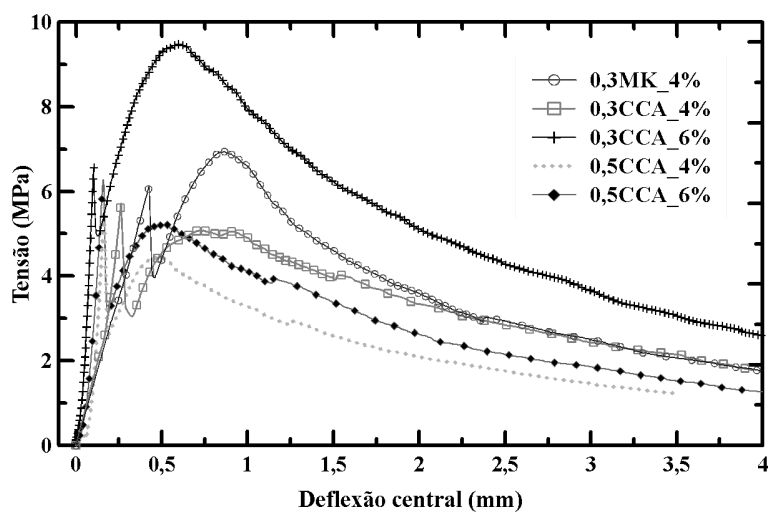
Segundo Ribeiro *et al.* (2021) e Souza (2006), a difusão de produtos agressivos para o interior da matriz cimentícia ocorre em função da sua permeabilidade e porosidade através do preenchimento dos vazios sem ocorrência de tensões internas, o que promove um incremento na capacidade resistente do material. No entanto, uma vez esgotada a capacidade de acomodação aos compostos expansivos, a região inalterada quimicamente da matriz passa a não suportar mais as tensões de tração desencadeando o processo de fissuração interna que pode levar à conseqüente perda de resistência do compósito em idades mais avançadas.

Swiderski *et al.* (2019) analisou o comportamento de argamassas com teores de substituição de 5%, 10% e 15% de CCA por cimento Portland. Após 105 dias de imersão de argamassas em solução de sulfato de sódio, a resistência à flexão cresceu com o aumento do teor de cinza de casca de arroz, indicando portanto, que teores de 10% e 15% podem contribuir para a mitigação da expansão causada pelo ataque de sulfatos.

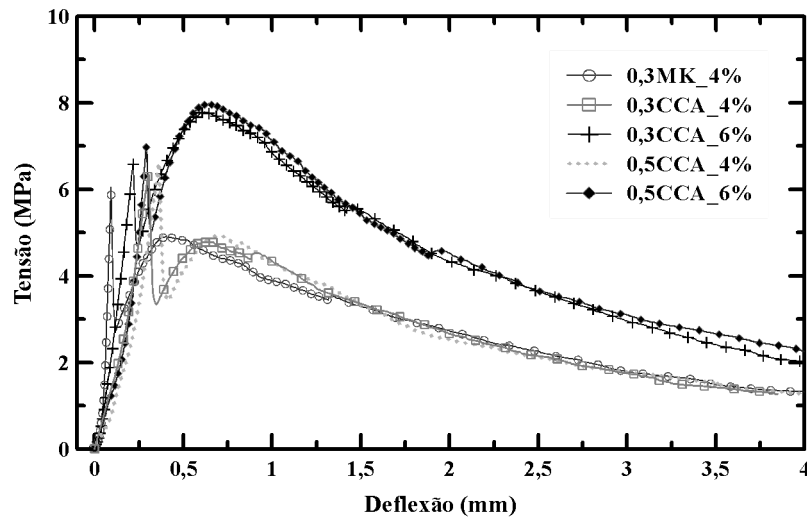
6.5 ATAQUE POR ÁCIDO SULFÚRICO

Analogamente aos procedimentos executados para a análise dos compósitos curados durante 28 dias e então submetidos à solução de sulfato de sódio, a análise buscou estudar o comportamento sob esforços de flexão em 3 pontos antes de imersão em solução de ácido sulfúrico (referência) e após 28 e 90 dias de imersão.

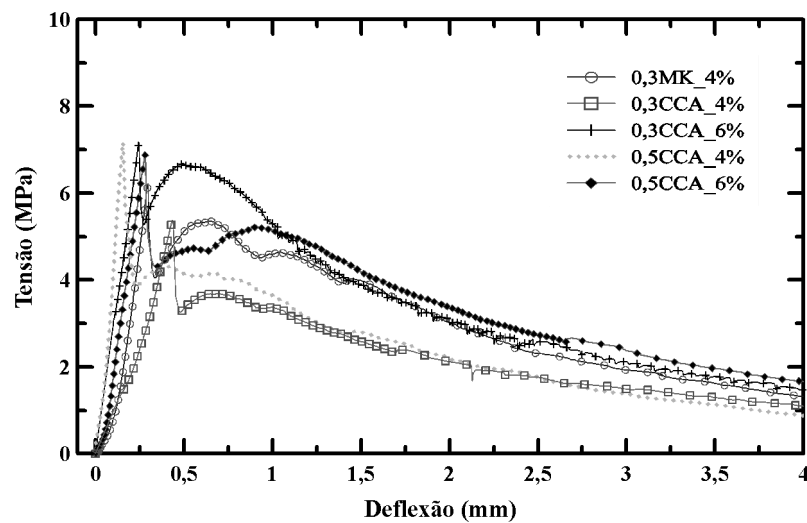
Na Figura 40 estão apresentadas as curvas de tensão x deformação típicas de referência (Figura 40a), aos 28 dias (Figura 40b) e após 90 de imersão (Figura 40c).



a)



b)



c)

Figura 40 Curvas típicas tensão x deformação dos compostos sob resistência à flexão em 3 pontos em imersão em solução de ácido sulfúrico. a) referência; b) 28 dias; c) 90 dias.

As curvas mostram que para um volume de fibras igual a 6% houve um incremento na tenacidade do material em ambas as matrizes contendo CCA e um ganho de tensão após o surgimento da primeira fissura do material, o que não aconteceu para os traços com volume de fibras igual a 4%.

De acordo com os dados apresentados pela Tabela 13, e com o auxílio da Figura 41, a substituição da metacaulinita pela cinza de casca de arroz pouco influenciou no desempenho do material. A metacaulinita mostrou-se eficaz na mitigação ao ataque por sulfatos, no entanto, não proporcionou melhoria significativa de desempenho ao material até os 90 dias.

Em ambas as matrizes com cinza de casca de arroz, o aumento do volume de fibras melhorou a resistência de primeira fissura do material. A evolução da resistência até os 28 dias foi mais expressiva para os traços com 50% de CCA. Após 28 dias, todas as misturas verificaram pouca variação no desempenho, com exceção do traço 0,5CCA6% que apresentou uma queda de 14% na sua capacidade resistente. No entanto, as tenacidades para os compósitos com maior volume de fibras foram maiores em ambas as idades estudadas, o que permite sugerir que o teor de 6% de fibras otimizou a capacidade de absorver energia do material mesmo após ataque ácido.

Tabela 13 Resistência à flexão em 3 pontos e índice de tenacidade dos compósitos sob ataque por ácido sulfúrico

Mistura	Idade	σ pico (CV)		δ pico (CV)		σ pós pico (CV)		δ pós pico (CV)		T_4 (CV)
		MPa	(%)	mm	(%)	MPa	(%)	mm	(%)	N/mm (%)
0,3MK4%	REF	5,99	(13,74)	0,17	(2,69)	6,40	(12,17)	0,92	(59,38)	1,10 (11,91)
0,3MK4%	28 dias	6,03	(4,40)	0,21	(8,49)	5,17	(5,44)	0,62	(24,77)	0,94 (4,01)
0,3MK4%	90 dias	6,20	(0,34)	0,30	(5,49)	5,12	(4,16)	0,68	(14,71)	2,04 (7,82)
0,3CCA4%	REF	5,98	(6,18)	0,44	(8,81)	5,34	(5,02)	0,81	(29,31)	1,13 (4,85)
0,3CCA4%	28 dias	6,34	(11,85)	0,30	(14,38)	5,16	(12,80)	0,71	(8,02)	0,93 (12,33)
0,3CCA4%	90 dias	6,57	(15,72)	0,35	(26,97)	3,66	(8,87)	0,68	(1,18)	0,75 (14,77)
0,3CCA6%	REF	6,66	(6,80)	0,13	(28,87)	8,23	(17,53)	0,79	(48,96)	1,68 (10,26)
0,3CCA6%	28 dias	6,74	(2,75)	0,26	(26,60)	7,26	(6,06)	0,58	(14,26)	1,27 (11,50)
0,3CCA6%	90 dias	6,69	(6,37)	0,25	(4,19)	6,08	(12,82)	0,70	(38,16)	1,16 (8,28)
0,5CCA4%	REF	5,36	(10,24)	0,14	(13,95)	4,94	(8,32)	0,50	(8,36)	0,83 (11,75)
0,5CCA4%	28 dias	6,82	(5,08)	0,25	(4,74)	4,94	(9,54)	0,58	(5,84)	0,87 (7,52)
0,5CCA4%	90 dias	7,00	(2,44)	0,19	(27,23)	4,32	(29,85)	0,60	(42,16)	0,73 (13,60)
0,5CCA6%	REF	5,74	(7,07)	0,17	(7,53)	5,47	(21,12)	0,87	(56,89)	1,03 (13,59)
0,5CCA6%	28 dias	7,44	(8,38)	0,36	(17,12)	7,18	(11,79)	0,71	(11,07)	1,31 (10,15)
0,5CCA6%	90 dias	6,36	(11,56)	0,77	(40,31)	4,98	(6,80)	0,90	(1,15)	1,13 (8,57)

A Figura 41 ilustra a evolução da resistência à flexão em 3 pontos aos 28 e 90 dias dos compósitos curados em água e imersos em solução agressiva em função dos teores de adições estudados.

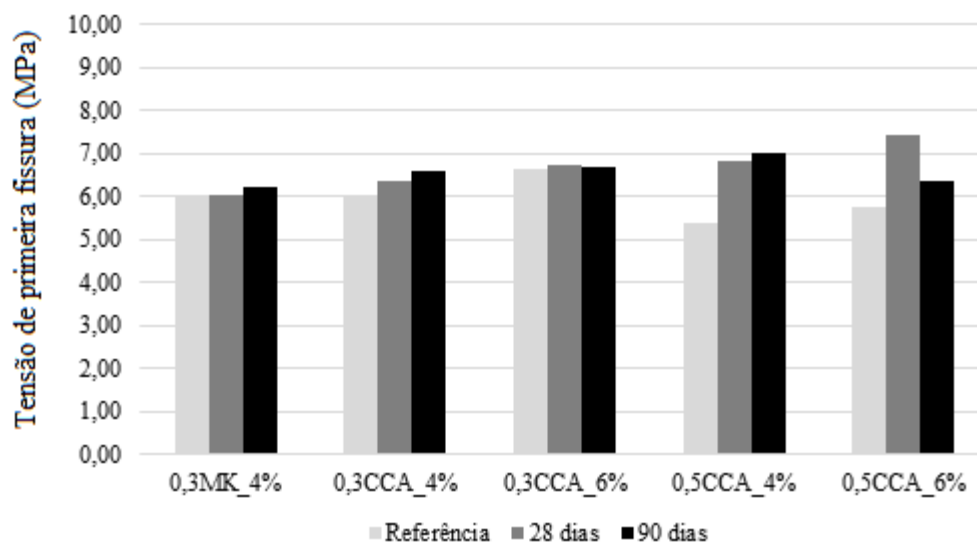


Figura 41 Evolução da tensão de primeira fissura nos ensaios de resistência à flexão em 3 pontos sob ataque por ácido sulfúrico

Kannan e Ganesan (2014) analisaram a durabilidade de concretos com teores de substituição de 30% de metacaulinita e cinza de casca de arroz até 90 dias de ataque por ácido sulfúrico através da análise de perda de massa. Aos 28 e 90 dias, o traço composto por metacaulinita apresentou perdas de massa aproximadamente 3 vezes maior em relação à mistura com cinza de casca de arroz, conferindo maior deterioração do material.

Chatveera e Lertwattanak (2011) verificaram que ao aumentar o teor de substituição de CCA de 20% para 40% em concretos submetidas ao ataque por ácido sulfúrico, a perda de massa foi maior aos 28 dias e principalmente aos 60 dias de imersão.

Mondal e Amin (2011) avaliaram o comportamento de argamassas com teores de substituição de 0%, 0%, 5%, 10%, 15% e 20% de cinza de casca de arroz em substituição ao cimento Portland em ambientes ácidos. Assim como no presente estudo, foi observado que entre 28 e 90 dias os valores de resistência à compressão para todos os teores estudados apresentaram valores mais ou menos uniformes.

Para a durabilidade de compósitos expostos a ataques por ácido sulfúrico, a substituição do cimento Portland por 30% de cinza de casca de arroz induz um efeito

positivo no aumento da resistência à flexão. O maior volume de fibras mostrou-se eficiente quanto à tenacidade do material.

7. CONCLUSÕES

O objetivo deste estudo foi avaliar a influência da substituição da metacaulinita, adição pozolânica comumente utilizada em compósitos reforçado com fibras vegetais, por cinza de casca de arroz, além do efeito da variação da fração volumétrica de fibras curtas de sisal e da utilização de CCA como única substituição parcial ao cimento sobre o comportamento físico e mecânico das amostras.

Baseando-se nas recomendações da literatura, foram empregados lavagem das fibras em água quente e lavagem alcalina com o intuito de retirar os resíduos aderidos à superfície das fibras, como graxas e resinas naturais, e melhorar a aderência fibra/matriz, respectivamente.

Ensaio de espalhamento foram realizados para avaliar a consistência dos compósitos. O resultado foi uma moldabilidade excelente para o compósito com metacaulinita e uma redução abrupta da trabalhabilidade com a substituição pela cinza de casca de arroz em ambas as composições. No entanto, as matrizes contendo CCA mostraram-se capazes de homogeneizar o reforço sem segregação para as duas frações volumétricas de fibras utilizadas.

Para a produção de compósitos com o intuito de obter matrizes com baixo teor de hidróxido de cálcio, verificou-se que a substituição da metacaulinita pela cinza de casca de arroz aumentou o CH livre da matriz. As matrizes contendo apenas cimento e CCA apresentaram teores de CH ainda mais altos tanto aos 7, quanto aos 28 dias. Os resultados indicaram que o uso da metacaulinita foi mais efetivo por apresentar os menores percentuais de hidróxido de cálcio em ambas as idades estudadas.

A análise do desempenho físico dos compósitos apontou que as misturas com metacaulinita apresentaram maiores densidades e menor capacidade de absorção de água tanto total, quanto por capilaridade. Além disso, foi observado que o maior volume de fibras aumentou a capacidade de absorção de água dos materiais produzidos.

Quanto ao comportamento mecânico dos compósitos, os resultados indicam que as misturas com maior fração volumétrica ($v_f=6\%$) e 30% do teor de cinza de casca de arroz apresentaram melhores comportamentos quando submetidos aos ensaios de

flexão, bem como melhor processo de fratura nestes ensaios. O processo de fratura das amostras verificou um padrão de múltipla fissuração apenas no compósito 0,3CCA6%, e nos demais compósitos, uma constância na densidade de fissuração quando submetidos à flexão, em função do surgimento de 2 a 4 fissuras seguidos de uma estabilização durante o carregamento.

Os resultados de ataque por sulfato de sódio mostraram através do comportamento sob flexão, que o compósito 0,3CCA6% seguiu apresentando melhor comportamento mecânico. No ataque por ácido sulfúrico, os melhores desempenhos foram verificados pelos compósitos com maiores teores de fibras. Entre ambos os ataques, foram verificados menores tensões de primeira fissura para as amostras submetidas à solução de ácido sulfúrico, o que pode estar relacionado com a deterioração da matriz em função da solubilidade dos produtos hidratados em ambientes com pH elevado.

8. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para a melhoria do entendimento da utilização da cinza de casca de arroz em compósitos reforçados com fibras de sisal, sugere-se a execução de estudos como:

- Estudo de análise de ciclo de vida para avaliar a custo-benefício financeiro e ambiental do uso de casca de arroz em relação à metacaulinita;
- Realização de ensaios de ataque por ácido sulfúrico e sulfato de sódio em idades mais avançadas, tanto das matrizes quanto da fibra;
- Análises de variação linear e variação de massa após o ataque por sulfato de sódio e ácido sulfúrico;
- Avaliação morfológica e microestrutural para a visualização e quantificação dos produtos hidratados, antes e após o ataque ácido.

9. REFERÊNCIAS

- AL-AMOUDI, O. S. B. Sulfate attack and reinforcement corrosion in plain and blended cements exposed to sulfate environments. **Building and Environment**. v. 33, pp. 53-61, 1998
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS - ASTM C 1012-13: Standard Test Method for Length Change of Hydraulic-Cement Mortars Exposed to a Sulfate Solution, U.S.A., 2013.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS - ASTM C 267-01: Standard Test Method for Chemical Resistance of Mortars, Grouts and Monolithic Surfacing, U.S.A., 2001.
- ARDANUY, M., CLARAMUNT, J., GARCÍA-HORTAL, J.A. Fiber-matrix interactions in cement mortar composites reinforced with cellulosic fibers. **Cellulose**. v. 18, pp. 281–289, 2011.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água por capilaridade. NBR 9779. Rio de Janeiro: ABNT, 2012.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. NBR 9778. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão: NBR 13279. Rio de Janeiro: ABNT, 2005.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Concreto endurecido - Determinação dos módulos de elasticidade e de deformação. NBR 8522. Rio de Janeiro: ABNT, 2021.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Edificações habitacionais — Desempenho: NBR 15575. Rio de Janeiro: ABNT, 2021.
- BENTUR, A; MINDESS, S. Fibre Reinforced Cementitious Composites. 2.ed. Modern Concrete Technology. 2006.
- BERTOLINI, L. **Materiais de construção: patologia, reabilitação e prevenção**. BECK, L.M.M.D. (tradução). São Paulo: Oficina de Textos. 414 p.
- Bledzki, A.K. and Gassan, J. (1999) Composites Reinforced with Cellulose Based Fibres. **Progress in Polymer Science**. v. 24, pp. 221-274, 1999.
- BRANDÃO, A. M. S. **Qualidade e durabilidade das estruturas de concreto armado**: aspectos relativos ao projeto. 1998. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1998.

BRANDT A. M. Fibre reinforced cement-based (FRC) composites after over 40 years of development in building and civil engineering. **Composite Structures**, v. 86, p. 3–9, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2008.03.006>.

CALLISTER JR; WILLIAM D; SOARES, S.M.S. Ciência e engenharia de materiais uma introdução. Rio de Janeiro: **Livros Técnicos e Científicos**, 2008.

CHATVEERA, B; LERTWATTANARUK, P. Durability of conventional concretes containing black rice husk ash. **Journal of environmental management**. pp. 59-66, 2011

CONAB (Companhia Nacional de Abastecimento). Perspectivas para a agropecuária Safra 2015/2016: Produtos de Verão. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, p. 1-5; Junho de 2015.

CONAB (Companhia Nacional de Abastecimento). Perspectivas para a agropecuária Safra 2018/2019. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, p. 1-112; Agosto de 2018.

CORREIA, E. A. S. **Compósitos de matriz geopolimérica reforçados com fibras vegetais de abacaxi e de sisal**. 113 f. Tese (Doutorado). Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2011.

DA GLORIA, M'hamed Yassin Rajiv. **Comportamento experimental e numérico de bioconcretos de madeira e de painéis sanduíches com faces em laminados reforçados com fibras longas de sisal**. Tese (Doutorado). Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2021

DINIZ, J. M. B. Fernandes; GIL, M. H.; CASTRO, J. A. A. M. **Hornification – its origin and interpretation in wood pulps**. *Wood Sci Technol.* v. 37, p. 489-494, 2004.

DUMANI, N.; MAPIRAVANA, J. Environmental and performance aspects of metakaolin as an alternative ordinary Portland cement extender. **Human Settlements**, p. 45, 2018.

EMMONS, P. H. **Concrete repair and maintenance illustrated: problem analysis, repair strategy techniques**. Brandon W. Emmons (ilust.). Kingston: RSMMeans. 296 p. 1993.

FAN, M; WECLAWSKI, B. Long natural fibre composites. **Advanced High Strength Natural Fibre Composites in Construction**. pp. 141–77, 2017. Doi:

FARIAS FILHO, J; TOLEDO FILHO, R. D; LIMA, P. R. L. Efeito da argila calcinada sobre a durabilidade de argamassas reforçadas com fibras curtas de sisal. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. v.14, n.10, p.1109–1114, 2010.

FARIAS FILHO, João de. **Efeito da adição metacaulinita e tijoo moído queimado na durabilidade de compósitos argamassa-fibra de sisal**. 1999. 128 f. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal da Paraíba, Campina Grande, 1999.

FÉDÉRATION INTERNATIONALE DU BÉTON. **FIB 53: Structural Concrete Textbook on behaviour, design and performance. Second edition, Volume 3: Design of durable concrete structures**, 2010, 390p.

FERRAZ, J. M.; MENEZZI, C. H. S.; TEXEIRA, D. E.; MARTINS, S. A. **Effects of treatment of coir fiber and cement/fiber ration on properties of cement-bonded composites**. BioResources, 3481-3492, 2011.

FERREIRA, Saulo Rocha. **Effect of surface treatments on the structure, mechanical, durability and bond behavior of vegetable fibers for cementitious composites**. Tese de Doutorado – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2016.

FERREIRA, S.R.; LIMA, P.R.L.; SILVA, F.A.; TOLEDO FILHO, R.D. Influência de ciclos molhagem-secagem em fibras de sisal sobre a aderência com matrizes de cimento Portland. **Revista Matéria**. ISSN 1517-7076, v. 7, n. 2, pp.1024-1034, 2012.

FERREIRA, S.R.; SILVA, F.A.; LIMA, P.R.L.; TOLEDO FILHO, R.D. Effect of hornification on the structure, tensile behavior and fiber matrix bond of sisal, jute and curauá fiber cement based composite systems. **Construction and Building Materials**. v.139, pg. 551-561, 2017.

FERREIRA, Saulo Rocha. **Influência da hornificação na aderência fibra matriz no comportamento mecânico de compósitos cimentícios reforçados com fibras curtas de sisal**. 2012. 129 f. Dissertação (Mestrado). Universidade Estadual de Feira de Santana, Feira de Santana, 2012.

FIDELIS, Maria Ernestina Alves. **Desenvolvimento e caracterização mecânica de compósitos cimentícios têxteis reforçados com fibras de juta**. Doutorado (Tese). Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2014.

General principles on the design of structures for durability. ISO 13823. 2008.

GÓIS, T. S. **Estudo da corrosão do concreto microbiologicamente induzida (ccmi) em estruturas de saneamento**. Dissertação (Mestrado). 166 f. Universidade Federal do Espírito Santo. Vitória, 2016.

GRAM, H. E. “**Durability of natural fibres in concrete**”, In: Swamy (Ed.) Natural Fibre Reinforced Cement and Concrete, pp. 143-172, Blackie and Son Ltd. 1988.

GURSEL AP, MARYMAN H, OSTERTAG C, A Life-Cycle Approach to Environmental, Mechanical, and Durability Properties of “Green” Concrete Mixes with Rice Husk Ash. **Journal of Cleaner Production**, 2015.

HELENE, Paulo Roberto do Lago. **Contribuição ao estudo da corrosão em armaduras de concreto armado**. Tese (Doutorado). Universidade de São Paulo, São Paulo, 1993.

HELENE, P. R. L. Vida útil das estruturas de concreto. In: CONGRESSO DE CONTROLE DE QUALIDADE, VI, Porto Alegre, 1997. Anais... Rio Grande do Sul: CONPAT, 1997.

HOPPE FILHO, J; SOUZA, D. J; MEDEIROS, M. H. F. ; PEREIRA, E; PORTELLA, K. F. Ataque de matrizes cimentícias por sulfato de sódio: adições minerais como agentes. **Cerâmica** 61. pp. 168-177, 2015.

<https://doi.org/10.1590/0366-69132015613581905>

HOPPE, Tiago Fernandes. **Resistividade elétrica de concretos contendo diferentes teores de cinza de casca de arroz**. 147 f. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2005.

HUNTZINGER, D. AND EATMON, T. A Life-Cycle Assessment of Portland Cement Manufacturing: Comparing the Traditional Process with Alternative Technologies. **Journal of Cleaner Production**. v 17, pp. 668-675, 2009.

HUNTZINGER, D. N.; EATMON, T. A life-cycle assessment of Portland cement manufacturing: comparing the traditional process with alternative technologies. **Journal of Cleaner Production**. v. 17, pp. 668-675, 2009.

INIYA. M. P; NIRMALKUMAR. K. A Review on Fiber Reinforced Concrete using sisal fiber. **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**. 2020

ISAIA, G .C. **Concreto : Ciência e Tecnologia**. IBRACON, 2016.

IZQUIERDO, I. S., RAMALHO, M. A. Aplicação de cinzas residuais e de fibra de sisal na produção de argamassas e concretos: Revisão. **Ingeniería y Desarrollo**. Universidad del Norte. v. 32 n. 2: pp. 344-368, 2014.

KANNAN, V; GANESAN, K. Chloride and chemical resistance of self compacting concrete containing rice husk ash and metakaolin. **Construction and Building Materials**. v. 51, pp. 225-234, 2014.

LEE, S.T; MOON, H.Y; SWAMY, R.N. Sulfate attack and role of silica fume in resisting strength loss. **Cement and Concrete Composites**. v. 27, i. 1, pp. 65-76, 2005.

LEITE, Dimas Delgado. **Fôrma permanente pré-fabricada em compósito cimentício reforçado com fibra de sisal para moldagem de viga de concreto armado**. 2019. 89 f. Dissertação (Mestrado). Universidade Estadual de Feira de Santana, Feira de Santana, 2019.

LIMA, Paulo R. L.; TOLÊDO FILHO, Romildo, D. Uso de metacaulinita para incremento da durabilidade de compósitos à base de cimento reforçados com fibra de sisal. **Ambiente Construído**. v. 8, n. 4, pp. 7-19, 2008.

LIMA, J. A. R. DE. **Avaliação das Consequências da Produção de Concreto no Brasil Para as Mudanças Climáticas**. São Paulo, 2010. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.

LIMA, Paulo Roberto Lopes. **Análise teórica e experimental de compósitos reforçados com fibras de sisal**. 263 f. Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2004

LIMA, P. R. L.; TOLEDO FILHO, R. D.; FEITOSA LIMA, J. M. Mecanismos de fissuração sob tração direta de compósitos cimentícios reforçados com fibras curtas de sisal. **Engevista**. v 15, n° 1, p 95-103, 2013.

LIMA, Paulo R. L.; TOLEDO FILHO, Romildo Dias; MELO FILHO, João A. Compressive stress-strain behaviour of cement mortar-composites reinforced with short sisal fiber. **Materials Research**. v.17, n.1, p. 38-46, 2014.

LIMA, Paulo R. L.; SANTOS, Daniele O. J.; FONTES, Cintia M. A.; BARROS, Joaquim A. O.; TOLEDO FILHO, Romildo D. Deflection Hardening of sustainable fiber-cement composites. **Green Materials**. v. 4, n. 1, p. 18-30, 2016.

MEHTA, P. K., MONTEIRO, P. J. M., 2014, *Concreto: microestrutura, propriedades e materiais*, 3a ed., São Paulo: Ibracon.

MELO FILHO, J. A. **Desenvolvimento e caracterização de laminados cimentícios reforçados com fibra longa de sisal**. Dissertação de mestrado – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2005.

MELO FILHO, J.A., SILVA, F.A., TOLEDO FILHO, R.D., FAIRBAIRN, E.M.R., **“Effect of Reinforcement Ratio and Molding Pressure on the Mechanical Performance of Short Sisal FRC”**, In: 4th International Conference on Science and Technology of Composite Materials, Rio de Janeiro-RJ, 2007.

MONDAL, B. C; AMIN, I. A study on sulfuric acid attack on cement mortar with rice husk ash. In: 4th Annual Paper Meet and 1st Civil Engineering Congress. pp. 22-24, 2011

OLIVEIRA, V. C. H. C.; DAMINELI, B. L.; AGOPYAN, V; JOHN, V. M. Estratégias para a minimização da emissão de CO₂ de concretos. **Ambiente Construído**. v.14, n. 4, Porto Alegre, 2014.

PAIVA, Otavio Augusto. **Durabilidade de concretos contendo cinza do bagaço da cana-de-açúcar**. 2016. 309 f. Tese (Doutorado). Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2016.

PAULA, M. O.; TINÔCO, I. de F. F.; RODRIGUES, C. S.; SILVA, E. N.; SOUZA, C. F. Potencial da cinza do bagaço da cana-de-açúcar como material de substituição parcial de cimento Portland. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. v.13,p.353-357, 2009

PEREIRA, A. M.; SILVA, C. A. R.; QUEIROZ, D. C. A.; MORAES, M. J. B.; MELGES, J. L. P.; TASHIMA, M. M.; AKASAKI, J. L. Estudo das propriedades mecânicas do concreto com adição de cinza de casca de arroz. **Revista Matéria**. pp.227-238, 2015. doi: <https://doi.org/10.1590/S1517-707620150001.0023>

PERLOT, C.; ROUGEAU, P.; DEHAUDT, S. Slurry of metakaolin combined with limestone addition for self-compacted concrete. Application for precast industry. **Cement & Concrete Composites**. v. 44, p.50-57, 2013.

POSSAN, E.; DEMOLINER, C.A. Desempenho, durabilidade e vida útil das edificações: Abordagem geral. **Revista Técnico Científica**. v. 1, n. 1, 2013.

POUEY, Maria Tereza Fernandes. 2006. **Beneficiamento da cinza de casca de arroz residual com vistas à produção de cimento composto e/ou pozolânico**. Tese (Doutorado). Universidade do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006.

RIBEIRO, Daniel Vêras *et al.*. (Org.). Deterioração das estruturas de concreto. In: RIBEIRO, Daniel Vêras. **Corrosão e Degradação em Estruturas de Concreto Teoria, controle e técnicas de análises e intervenção**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2018.

RIBEIRO, Daniel Vêras Ribeiro. **Princípios da Ciência dos Materiais Cimentícios: Produção, Reações, Aplicações e Avanços Tecnológicos**. 1.ed. – Curitiba: Appris, 2021.

RIGON, M. R. **Avaliação ambiental do uso da casca de arroz como biomassa para fins energéticos e do coproduto cinza aplicado ao concreto**. São Leopoldo, 2015. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo, 2015.

ROCHA, Camila Aparecida Abelha. **Influência da pressão e temperatura de cura e da adição de NaCl e KCl no comportamento de pastas para cimentação de poços de petróleo**. 2015. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2015.

ROMANOVA, A.; MAHMOODIAN, M.; CHANDRASEKARA, U.; ALANI, M. A. Concrete Sewer Pipe Corrosion Induced by Sulphuric Acid Environment. **International Journal of Civil, Environmental, Structural, Constr. and Archit. Engineering**. V. 9, n. 4, 2015.

SANTOS, Daniele Oliveira Justo. **Utilização de matriz com areia reciclada para produção de compósitos reforçados com fibra de sisal**. Dissertação (Mestrado) – Pós-graduação em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Estadual de Feira de Santana, Feira de Santana, 2014.

SANTOS, Daniele Oliveira Justo. **Desenvolvimento de compósitos cimentícios reforçados painéis sanduíche com fibra leves com faces s curta s em de sisal e núcleo em bioconcreto de casca de arroz**. Tese (Doutorado). Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2020.

SANTOS, R. J.; LIMA, P. R. L. **Aderência fibra-matriz em compósitos à base de cimento reforçados com dois tipos de resíduo de sisal**. In: Encontro Nacional Sobre Aproveitamento de Resíduos na Construção Civil, 3, 2013, São Leopoldo. Anais eletrônicos... Porto Alegre: ANTAC, 2013.

SILVA FILHO, L. C. P. **Durabilidade do concreto à ação de sulfatos. Análise do efeito da permeação de água e da adição de microssilica.** Dissertação (Mestrado). 152 p. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 1994.

SILVA JUNIOR, Iranildo Barbosa da. **Propriedades mecânicas e fluência de compósitos cimentícios têxteis reforçados com fibras de sisal.** 2020. Dissertação (Mestrado). Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, 2020.

SILVA, F. A. **Durabilidade e propriedades mecânicas de compósitos cimentícios reforçados por fibra de sisal.** Tese de Doutorado – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2009.

SILVA, F. A., TOLEDO FILHO, R. D., MELO FILHO, J. A., FAIRBAIRN, E. M. R. Physical and Mechanical Properties of Durable Sisal Fiber–Cement Composites. **Construction and Building Materials.** v. 24, pp. 777-785; 2010.

SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO. **Relatório Sobre Produção anual de cimento Portland.** 2019. Disponível em: <http://snic.org.br/assets/pdf/relatorio_anual/rel_anual_2019.pdf>. Acesso em: 9 abr. 2021.

SOUZA, R.; REBOITA, M.; WERLE, A. P.; CARVALHO COSTA, E. B. Influência das variáveis atmosféricas na degradação dos materiais da construção civil. REEC - **Revista Eletrônica de Engenharia Civil**, v. 13, n. 1, 31 ago. 2017.

SOUZA, V.C. M.; RIPPER, T. Patologia, recuperação e reforço de estruturas de concreto. São Paulo, PINI, 2009. 250p.

SWIDERSKI, B; DELABONA, F. J; RUFATO, M. E; GAVA, G. P. Avaliação do emprego da cinza da casca de arroz ao concreto frente ao ataque por sulfato de sódio. In: 4º Simpósio Paranaense de Patologia das Construções. pp. 168-177, 2019

TANG, S.W. ; YAO, Y; ANDRADE, C; LI, Z.J. Recent durability studies on concrete structure. **Cement Concrete Research.** v. 78, pp. 143-154, 2015

TASHIMA. Mauro Mitsuuchi. **Cinza de Casca de Arroz altamente reativa: método de produção, caracterização físico-química e comportamento em matrizes de cimento Portland.** Dissertação (Mestrado). Universidade Estadual de São Paulo, Ilha Solteira, 2006.

TOLEDO FILHO, R ; GHAVAMI, K ; SANJUAN, M ; ENGLAND, G . Free, restrained and drying shrinkage of cement mortar composites reinforced with vegetable fibres. **Cement & Concrete Composites** , Inglaterra, v. 27, n.5, p. 537-546, 2005

TOLEDO FILHO, R. D. ; JOSEPH, KURUVILA ; GHAVAMI, K ; ENGLAND, G.L . The Use of sisal fibre as reinforcement in cement based composites. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental.** Campina Grande - Pb, v. Vol. 3, n.No. 2, p. 245-256, 1999

TOLEDO FILHO, R. D. et al. Durability of alkalisensitivity sisal and coconut fibres in cement mortar composites. **Cement and Concrete Composites**, England, v. 22, p. 127-143, 2000

TOLEDO FILHO, R. D. **Materiais compósitos reforçados com fibras naturais: caracterização experimental**. 303 p. v 1. Tese (Doutorado Engenharia Civil) – PUC/ Departamento de Engenharia Civil, Rio de Janeiro, 1997.

TOLEDO FILHO, R. D., GHAVAMI, K., ENGLAND, G. L., SCRIVENER, K. Development of Vegetable Fibre–Mortar Composites of Improved Durability. **Cement & Concrete Composites**, v. 25, pp. 185–196, 2003.

VIEIRA, Amanda Pereira. **Avaliação da retração autógena de concretos de alto desempenho produzidos com cinza da casca de arroz**. Dissertação (Mestrado). 183 f. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2018.

WEI e MEYER. 2016. Utilization of rice husk ash in green natural fiber-reinforced cement composites: Mitigating degradation of sisal fiber. **Cement and Concrete Research**. v. 81, p. 94-111, 2016.