



DOSAGEM MICROMECAÂNICA DE COMPÓSITOS CIMENTÍCIOS REFORÇADOS COM FIBRAS DE JUTA

Yasmim Gabriela dos Santos Mendonça

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Orientadores: Romildo Dias Toledo Filho
Bartosz Zukowski

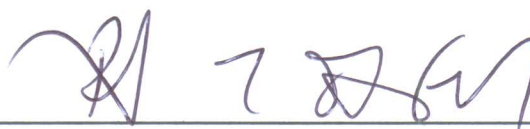
Rio de Janeiro
Julho de 2018

DOSAGEM MICROMECAÂNICA DE COMPÓSITOS CIMENTÍCIOS REFORÇADOS
COM FIBRAS DE JUTA

Yasmim Gabriela dos Santos Mendonça

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO LUIZ COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA (COPPE) DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA CIVIL.

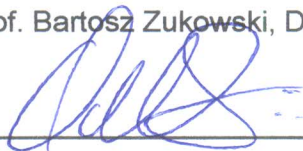
Examinada por:



Prof. Romildo Dias Toledo Filho, D.Sc.



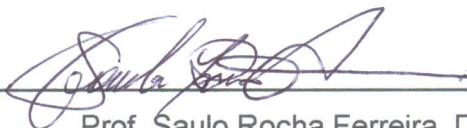
Prof. Bartosz Zukowski, D.Sc.



Prof. Oscar Aurelio Mendoza Reales, D.Sc.



Profª. Maria Ernestina Alves Fidelis, D.Sc.



Prof. Saulo Rocha Ferreira, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

JULHO DE 2018

Mendonça, Yasmim Gabriela dos Santos

Dosagem micromecânica de compósitos cimentícios reforçados com fibras de juta / Yasmim Gabriela dos Santos Mendonça. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2018.

XXI, 99 p.: il.; 29,7 cm.

Orientadores: Romildo Dias Toledo Filho

Bartosz Zukowski

Dissertação (mestrado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia Civil, 2018.

Referências Bibliográficas: p. 93-99.

1. Compósitos cimentícios - fibras de juta. 2. Dosagem micromecânica. 3. Caracterização mecânica. I. Toledo Filho, Romildo Dias *et al.* II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Civil. III. Título.

“E sabemos que todas as coisas contribuem juntamente para o bem daqueles que amam a Deus, daqueles que são chamados segundo o seu propósito.”

Romanos 8:28

AGRADECIMENTOS

A Deus, porque é Dele, por Ele e para Ele, todas as coisas. A Ele seja a glória para sempre!

Aos meus pais, Natalia e Rinaldo, por todo o esforço feito para que eu tivesse acesso a uma educação de qualidade, pelo apoio, incentivo e amor incondicional. Eu os amo muito! Essa conquista também é de vocês!

A minha irmã, Aishila, mesmo que ainda criança e muito novinha, me motiva a buscar e concretizar os meus sonhos para futuramente também contribuir para a realização dos dela.

Aos meus orientadores Romildo Dias Toledo Filho e Bartosz Zukowski, por todos os ensinamentos e principalmente, por toda paciência que demonstraram comigo ao longo da pesquisa. Por todo conhecimento compartilhado e pela disposição em sempre ajudar, propondo soluções e melhorias para o andamento do trabalho. Me sinto privilegiada por ter sido orientada por eles.

Ao Redescar, meu melhor amigo, meu amor, pelo companheirismo, dedicação e paciência nas fases mais complicadas da pesquisa. Por estar sempre disposto a me ajudar. Por todo apoio e por sempre acreditar em mim, me incentivando a ser cada dia melhor. Meu amor, você é um presente de Deus em minha vida!

Aos meus companheiros de mestrado, em especial ao Gustavo, Alfredo, João, Isis e André, que mais que colegas, se tornaram minha família no Rio de Janeiro, por compartilharem momentos difíceis e também momentos felizes que ficarão para sempre guardados em minha memória.

À minha amiga e vizinha “cabroninha”, Ana Camacho, pela amizade, conversas e conselhos. Pelas comidas mexicanas maravilhosas que deixaram nossos dias sempre mais felizes.

A todos os colegas do NUMATS, em especial a minha amiga Liuski, com quem compartilhei momentos bem agradáveis, como a participação em nosso primeiro congresso Internacional, no México. Ao Yassin da Gloria e à Daniele Justo, por toda ajuda em minha fase experimental, por estarem sempre dispostos a responderem

minhas dúvidas e buscarem, junto comigo, soluções para alguns problemas ocorridos nessa fase.

Ao CNPq, pelo apoio financeiro para realização da pesquisa.

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

DOSAGEM MICROMECAÂNICA DE COMPÓSITOS CIMENTÍCIOS REFORÇADOS COM FIBRAS DE JUTA

Yasmim Gabriela dos Santos Mendonça

Julho/2018

Orientadores: Romildo Dias Toledo Filho

Bartosz Zukowski

Programa: Engenharia Civil

Neste trabalho utiliza-se o modelo micromecânico teórico desenvolvido por LEUNG *et al.* (1991) para a dosagem de compósitos cimentícios reforçados com fibra de juta com endurecimento na tração direta. A energia de fratura da matriz de cimento, as propriedades físicas e mecânicas da fibra de juta e a aderência fibra-matriz foram alteradas para permitir a dosagem micromecânica dos compósitos. Para alterar a energia de fratura da matriz foram utilizadas areias com diâmetro máximo associado à 50% de material passante (D50) de 175, 300 e 410 μ m. As propriedades da fibra de juta e sua aderência com as matrizes de cimento foram alteradas realizando-se um tratamento alcalino em solução saturada de Ca(OH)₂. O comprimento crítico da fibra de juta tratada foi ajustado para 20mm e o volume de fibras necessário para obtenção do comportamento de endurecimento na tração direta para cada matriz foi determinado utilizando-se o modelo micromecânico. Os resultados experimentais e a modelagem indicaram que as matrizes com areias de D50 300 e 410 μ m apresentavam maior potencial para a surgimento de múltiplas fissuras sob cargas de tração direta quando frações volumétricas de 3 e 4% fossem utilizadas como reforço. Por fim, para validação do estudo foram produzidos e realizados ensaios de tração direta e flexão nos compósitos desenvolvidos. Os resultados obtidos indicaram ser de 1,5 e 2,0 MPa a resistência de primeira fissura da matriz para se obter endurecimento na tração direta quando se usasse teores de fibras de juta tratadas de 3 e 4%, respectivamente.

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

MICROMECHANICAL DOSAGE OF CEMENTITIOUS COMPOSITES REINFORCED
WITH JUTE FIBERS

Yasmim Gabriela dos Santos Mendonça

July/2018

Advisors: Romildo Dias Toledo Filho
Bartosz Zukowski

Department: Civil Engineering

In this work the micromechanical theoretical model developed by LEUNG *et al.* (1991) is used for the dosage of Strain Hardening Cementitious Composites (SHCC) reinforced with jute fiber. To let the composites dosage, it was considered the changes of the matrix fracture energy, the physical and mechanical properties of the fiber and fiber-matrix bonding. The variation of the fracture matrix energy was carried out with the utilization of three maximum sand particle sizes related to 50% of passing material, with diameters of 175, 300 and 410 μm . The jute fiber properties and the bonding with the cement matrix was evaluated with the application of an alkaline surface treatment based in a saturated solution of $\text{Ca}(\text{OH})_2$. The critical fiber length of treated fiber was adjusted to 20mm and the fiber volume needed to obtain the strain hardening behavior for every matrix was determined using the micromechanical model. Experimental and theoretical results indicated that the cementitious matrix with maximum particle size of 300 and 410 μm have the major potential for the developing of multiple cracking in direct tension, considering reinforce with fiber volumes between 3-4%. For the model validation, it was performed direct tension and flexural tests. The results obtained indicated that values of matrix first crack strength of 1,5 and 2MPa are needed to obtain strain hardening behavior with treated fiber volume of 3% and 4%, respectively.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	MOTIVAÇÃO DO TRABALHO	1
1.2	OBJETIVOS	2
1.3	ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO.....	3
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	4
2.1	FIBRA VEGETAL	4
2.1.1	INTRODUÇÃO.....	4
2.1.2	FIBRA DE JUTA.....	7
2.1.3	COMPARAÇÃO DAS PROPRIEDADES DAS FIBRAS VEGETAIS.....	9
2.1.4	TRATAMENTOS SUPERFICIAIS.....	10
2.2	COMPÓSITOS CIMENTÍCIOS COM ENDURECIMENTO NA TRAÇÃO DIRETA (<i>SHCC</i>)	12
2.2.1	HISTÓRICO DE MATERIAIS COMPÓSITOS COM FIBRAS	12
2.2.2	MATRIZES DE <i>SHCC</i>	14
2.2.3	COMPÓSITOS REFORÇADOS COM FIBRAS VEGETAIS E TENTATIVAS DE <i>SHCC</i>	16
2.2.4	APLICAÇÕES DE <i>SHCC</i>	20
2.3	MODELO MICROMECAÂNICO	23
3	PROGRAMA EXPERIMENTAL: MATERIAIS E MÉTODOS.....	25
3.1	FIBRAS	25
3.1.1	TRATAMENTOS SUPERFICIAIS.....	26

3.1.2	ANÁLISE MICROESTRUTURAL	26
3.1.3	ANÁLISE TERMOGRAVIMÉTRICA (TGA).....	26
3.2	MATRIZ CIMENTÍCIA	27
3.2.1	CIMENTO PORTLAND, METACAULINITA E CINZA VOLANTE	27
3.2.2	AREIA	29
3.2.3	ÁGUA.....	30
3.2.4	ADITIVOS QUÍMICOS	30
3.2.5	DOSAGEM.....	30
3.3	PRODUÇÃO DOS COMPÓSITOS	33
3.3.1	PROCEDIMENTO DE MOLDAGEM.....	33
3.3.2	PROCEDIMENTO DE CURA.....	34
3.4	ENSAIOS MECÂNICOS.....	34
3.4.1	FIBRAS	35
3.4.1.1	Tração.....	35
3.4.2	MATRIZ CIMENTÍCIA E COMPÓSITO.....	37
3.4.2.1	Teste de Fratura	37
3.4.2.2	Tração Direta	39
3.4.2.3	Flexão em quatro pontos	42
3.4.2.4	Compressão.....	43
3.4.3	INTERFACE FIBRA MATRIZ.....	44
3.4.3.1	Ensaio de Arrancamento	44
3.5	MODELO MICROMECAÂNICO	47

4	RESULTADOS	51
4.1	INFLUÊNCIA DOS TRATAMENTOS SUPERFICIAIS NAS FIBRAS.....	51
4.1.1	ANÁLISE MICROESTRUTURAL	51
4.1.2	ANÁLISE TERMOGRAVIMÉTRICA (TGA) DA FIBRA DE JUTA ANTES E APÓS O TRATAMENTO ALCALINO	52
4.1.3	TRAÇÃO	53
4.2	INFLUÊNCIA DO TAMANHO DA AREIA NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DA MATRIZ CIMENTÍCIA.....	57
4.2.1	TESTE DE FRATURA.....	57
4.2.2	TRAÇÃO DIRETA	58
4.2.3	COMPRESSÃO	60
4.3	INFLUÊNCIA DO TRATAMENTO ALCALINO NA ADERÊNCIA FIBRA-MATRIZ.....	61
4.4	MODELO MICROMECAÂNICO DE DOSAGEM	65
4.4.1	MODELOS PARA A MATRIZ AR175.....	65
4.4.2	MODELOS PARA A MATRIZ AR300.....	67
4.4.3	MODELOS PARA A MATRIZ AR410.....	70
4.5	COMPÓSITOS CIMENTÍCIOS	72
4.5.1	CONSISTÊNCIA PADRÃO	73
4.5.2	TRAÇÃO	74
4.5.3	FLEXÃO	81
5	CONCLUSÕES	91
5.1	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	92

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 93

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1: Descrição de uma fibra natural de bambu (Adaptada de WEGST <i>et al.</i> , 2015).....	5
Figura 2.2: Micrografia das fibras de (a) sisal, (b) curauá, (c) coco e (d) juta (FIDELIS <i>et al.</i> , 2013).....	5
Figura 2.3: Processo de extração da fibra de juta: (a) corte manual, (b) lavagem da fibra, (c) secagem da fibra (Revista Globo Rural, 2010).	8
Figura 2.4: Diferentes morfologias da fibra de juta (FIDELIS, 2014).....	9
Figura 2.5: Comportamento de compósitos reforçados com fibras submetidos a ensaios de tração direta (esquerda) e flexão (direita) (adaptada de NAAMAN e REINHARDT, 2006).....	14
Figura 2.6: Exemplo de aplicação de material <i>SHCC</i> como amortecedor de construção em estruturas com risco de deriva por terremoto com (a) dispositivo aplicado no fim do vão, (b) vários dispositivos aplicados no centro do vão e (c) dispositivos aplicados no primeiro.....	21
Figura 2.7: Barragem Mitaka (Japão) (a) visão geral, (b) superfície de concreto severamente danificada por fragmentações, fissuras e infiltrações e (c) reparo sendo executado com a utilização de <i>SHCC</i> projetado (ECC APPLICATIONS, 2017).	21
Figura 2.8: Tabuleiro de ponte estaiada em Hokkaido (Japão) utilizando o <i>SHCC</i> em sua construção (ECC APPLICATIONS, 2017).....	22
Figura 2.9: Aplicação de <i>SHCC</i> no reparo do tabuleiro de uma ponte em Michigan/Estados Unidos (LEPECH e LI, 2009).	22
Figura 2.10: Aplicação de <i>SHCC</i> no canal de irrigação em Shiga (Japão), (a) antes e (b) depois da aplicação do <i>SHCC</i> (ROKUGO <i>et al.</i> , 2006).	23
Figura 2.11: Diferenças de padrões de células de corrosão pelo modo de desenvolvimento de múltiplas fissuras (Adaptada da JAPAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS, 2008).	23

Figura 3.1: Preparação das fibras antes do tratamento: (a) lavagem, (b) secagem, (c) placa de madeiras com prego e guilhotina utilizadas para penteamento e corte das fibras.	25
Figura 3.2: Curva granulométrica do CP II F-32, da cinza volante e da metacaulinita.	28
Figura 3.3: Curvas granulométricas das areias utilizadas.	29
Figura 3.4: Análise termogravimétrica da pasta cimentícia em diferentes idades (28, 60 e 90 dias).	31
Figura 3.5: Espalhamento das matrizes: (a) AR175, (b) AR300 e (c) AR410.	32
Figura 3.6: Procedimento de moldagem: (a) misturador com capacidade de 20 litros, (b) ingredientes sólidos da matriz misturados, (c) ingredientes sólidos misturados com água, (d) ingredientes misturados após adição do superplastificante, (e) mistura pronta após a adição das fibras de juta, (f) corpos de prova já moldados e prontos para iniciar o processo de cura.	34
Figura 3.7: Moldes utilizados para a realização do ensaio de tração da fibra de juta nos comprimentos de 20, 30 e 40mm.	35
Figura 3.8: (a) Máquina de ensaios Tytron 250 e (b) detalhe do corpo de prova posicionado e fixado pelas garras antes da realização do ensaio.	36
Figura 3.9: Sequência de procedimentos para o teste de tração das fibras: (a) amostra presa pelas garras ainda com o papel, (b) papel da amostra é cortado nas extremidades, (c) amostra após realização do ensaio ainda fixada nas garras.	36
Figura 3.10: Contorno ImageJ para determinação da área das seções transversais das fibras.	37
Figura 3.11: Geometria da amostra TDCB (GRABOIS, 2017).	38
Figura 3.12: Teste de fratura: (a) corpo de prova antes da realização do ensaio, (b) amostra sendo ensaiada, (c) propagação da fissura durante a realização do ensaio, (d) amostra ensaiada.	38
Figura 3.13: Curva típica obtida no teste de fratura.	39

Figura 3.14: Configuração da amostra no ensaio de tração direta (adaptada da JAPAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS, 2008).....	40
Figura 3.15: Ensaio de tração direta: (a) corpo de prova posicionado na máquina de ensaios, (b) detalhe do terço central do corpo de prova.	41
Figura 3.16: Linhas de referência para contagem das fissuras em uma amostra ensaiada na tração direta.	41
Figura 3.17: Ensaio de flexão em quatro pontos: (a) câmera digital posicionada para o monitoramento do surgimento de fissuras no corpo de prova, (b) detalhe do posicionamento do corpo de prova na máquina de ensaios durante a realização do teste.	42
Figura 3.18: Ensaio de compressão axial: (a) faceamento do corpo de prova, (b) corpos de prova faceados e prontos para serem ensaiados, (c) máquina de ensaios Shimadzu UH-F e (d) detalhe do corpo de prova posicionado na máquina de ensaios.	43
Figura 3.19: Sequência de preparação da amostra utilizada no ensaio de arrancamento.....	45
Figura 3.20: Ensaio de arrancamento da fibra: (a) corpo de prova posicionado na máquina de ensaios Tytron 250, (b) detalhe da fibra sendo arrancada do corpo de prova ensaiado.	46
Figura 3.21: Curva representativa da abertura de fissura com energia complementar ($J' b$) e máxima tensão de ligação entre fibra-matriz (σ_0) para a correspondente abertura máxima de fissura (δ_0) (adaptada de ZUKOWSKI, 2017).	47
Figura 3.22: Tipos de propagação de fissura: instável (esquerda) e estável (direita) (SIERRA BELTRÁN, 2011).	48
Figura 4.1: Diferentes morfologias das fibras de juta sem tratamento (imagens obtidas no MEV).....	51
Figura 4.2: Superfície da fibra de juta: (a) sem tratamento, (b) hornificada em água, e (c) tratada em solução alcalina (imagens obtidas no MEV).	52
Figura 4.3: Análise térmica das fibras de juta antes e depois do tratamento alcalino. .	53

Figura 4.4: Curvas tensão-deformação para diferentes comprimentos de fibras de juta sem tratamento.....	54
Figura 4.5: Curvas tensão-deformação para diferentes comprimentos de fibras de juta hornificadas em água.	55
Figura 4.6: Curvas tensão-deformação para diferentes comprimentos de fibras de juta alcalinas.....	56
Figura 4.7: Curvas representativas de força <i>versus</i> abertura do clip gauge das matrizes AR175, AR300 e AR410.....	57
Figura 4.8: Curvas representativas de tensão <i>versus</i> deformação obtidas nos ensaios de tração direta realizados nas matrizes AR175, AR300 e AR410.....	59
Figura 4.9: Curvas representativas de tensão <i>versus</i> deformação das matrizes AR175, AR300 e AR410.....	60
Figura 4.10: Representação gráfica do teste de arrancamento das fibras de juta não tratadas (esquerda) e tratadas em solução alcalina (direita) na matriz AR175.....	62
Figura 4.11: Representação gráfica do teste de arrancamento das fibras de juta não tratadas (esquerda) e tratadas em solução alcalina (direita) na matriz AR300.....	63
Figura 4.12: Representação gráfica do teste de arrancamento das fibras de juta não tratadas (esquerda) e tratadas em solução alcalina (direita) na matriz AR410.....	64
Figura 4.13: Modelo teórico de dosagem para matriz AR300.	69
Figura 4.14: Modelo teórico de dosagem para a estimativa A.	69
Figura 4.15: Modelo teórico de dosagem para a estimativa B.	69
Figura 4.16: Modelo teórico de dosagem para matriz AR410.	71
Figura 4.17: Modelo teórico de dosagem para a estimativa A.	72
Figura 4.18: Modelo teórico de dosagem para a estimativa B.	72
Figura 4.19: Espalhamento das misturas produzidas a partir da adição de fibras na matriz (a) AR300 - 3% de fibras, (b) AR300 - 4% de fibras, (c) AR410 - 3% de fibras, (d) AR410 - 3% de fibras.	73

Figura 4.20: Curvas tensão-deformação dos compósitos produzidos com adição de 3 e 4% de fibras na matriz AR300.....	74
Figura 4.21: Abertura da fissura na sequência das deformações do compósito representativo do grupo de 3% de fibras alcalinas na matriz AR300.....	75
Figura 4.22: Curva tensão-deformação com os correspondentes valores de aberturas de fissuras do compósito representativo do grupo de 3% de fibras alcalinas na matriz AR300.....	76
Figura 4.23: Abertura da fissura na sequência das deformações do compósito representativo do grupo de 4% de fibras alcalinas na matriz AR300.....	76
Figura 4.24: Curva tensão-deformação com os correspondentes valores de aberturas de fissuras do compósito representativo do grupo de 4% de fibras alcalinas na matriz AR300.....	77
Figura 4.25: Curvas tensão-deformação dos compósitos produzidos a partir da matriz AR410 com 3% e 4% de reforço com fibras.....	78
Figura 4.26: Abertura das fissuras na sequência das deformações do compósito representativo do grupo de 3% de fibras alcalinas na matriz AR410.....	79
Figura 4.27: Curva tensão-deformação com os correspondentes valores de aberturas de fissuras do compósito representativo do grupo de 3% de fibras alcalinas na matriz AR410.....	80
Figura 4.28: Abertura da fissura na sequência das deformações do compósito representativo do grupo de 4% de fibras alcalinas na matriz AR410.....	80
Figura 4.29: Curva tensão-deformação com os correspondentes valores de aberturas de fissuras do compósito representativo do grupo de 4% de fibras alcalinas na matriz AR410.....	81
Figura 4.30: Curvas tensão-deflexão dos compósitos produzidos a partir da matriz AR300 com 3% e 4% de reforço com fibras.....	82
Figura 4.31: Abertura das fissuras na sequência das deflexões do compósito representativo do grupo de 3% de fibras na matriz AR300.....	83

Figura 4.32: Curva tensão-deformação com os correspondentes valores de aberturas de fissuras do compósito representativo do grupo de 3% de fibras alcalinas na matriz AR300.....	84
Figura 4.33: Abertura das fissuras na sequência das deflexões do compósito representativo do grupo de 4% de fibras alcalinas na matriz AR300.	85
Figura 4.34: Curva tensão-deformação com os correspondentes valores de aberturas de fissuras do compósito representativo do grupo de 4% de fibras alcalinas na matriz AR300.....	85
Figura 4.35: Curvas tensão-deflexão dos compósitos produzidos a partir da matriz AR410 com 3% e 4% de reforço com fibras.....	86
Figura 4.36: Abertura das fissuras na sequência das deflexões do compósito representativo do grupo de 3% de fibras alcalinas na matriz AR410.	88
Figura 4.37: Curva tensão-deformação com os correspondentes valores de aberturas de fissuras do compósito representativo do grupo de 3% de fibras alcalinas na matriz AR410.....	88
Figura 4.38: Abertura das fissuras na sequência das deflexões do compósito representativo do grupo de 4% de fibras na matriz AR410.	89
Figura 4.39: Curva tensão-deformação com os correspondentes valores de aberturas de fissuras do compósito representativo do grupo de 4% de fibras alcalinas na matriz AR410.....	90

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1: Composição química de fibras vegetais (FIDELIS, 2014).....	6
Tabela 2.2: Propriedades gerais de fibras.....	7
Tabela 2.3: Propriedades físicas e químicas da fibra de juta.....	8
Tabela 2.4: Área e diâmetro de lumens, quantidade e espessura de fibrocélulas (FIDELIS, 2014).....	9
Tabela 2.5: Resultados do ensaio a tração para as fibras de curauá, juta e sisal (FIDELIS, 2014).....	10
Tabela 3.1: Composição química (%): CP II F-32, metacaulinita e cinza volante.	27
Tabela 3.2: Diâmetro dos materiais cimentícios (D10, D50 e D90).....	28
Tabela 3.3: Diâmetro das areias utilizadas (DMC, D50 e D85).....	30
Tabela 3.4: Valores de espalhamento das matrizes utilizadas.....	32
Tabela 3.5: Consumo em kg/m ³ de materiais nas matrizes utilizadas.	32
Tabela 4.1: Resultados médios e desvio padrão dos diferentes comprimentos de fibras de juta sem tratamento.	54
Tabela 4.2: Resultados médios e desvio padrão dos diferentes comprimentos de fibras de juta hornificadas em água.....	55
Tabela 4.3: Resultados médios e desvio padrão dos diferentes comprimentos de fibras de juta alcalinas.	56
Tabela 4.4: Valores médios de força crítica e de tenacidade das matrizes AR175, AR300 e AR410.....	58
Tabela 4.5: Valores médios de tensão máxima de tração e de deformação das matrizes AR175, AR300 e AR410.	59
Tabela 4.6: Valores médios das propriedades mecânicas sob compressão aos 28 dias das matrizes AR175, AR300 e AR410.	60

Tabela 4.7: Resultados médios e desvio padrão do teste de arrancamento da fibra de juta na matriz AR175.	62
Tabela 4.8: Resultados médios e desvio padrão do teste de arrancamento da fibra de juta na matriz AR300.	63
Tabela 4.9: Resultados médios e desvio padrão do teste de arrancamento da fibra de juta na matriz AR410.	64
Tabela 4.10: Parâmetros de entrada nos modelos teóricos de dosagem para a matriz AR175 e para a simulação realizada.	66
Tabela 4.11: Resultados obtidos por meio dos modelos teóricos de dosagem para a matriz AR175 e para a simulação realizada.	66
Tabela 4.12: Parâmetros de entrada nos modelos teóricos de dosagem para a matriz AR300 e para as simulações realizadas.	67
Tabela 4.13: Resultados obtidos por meio dos modelos teóricos de dosagem para a matriz AR300 e para as simulações realizadas.	67
Tabela 4.14: Parâmetros de entrada nos modelos teóricos de dosagem para a matriz AR410 e para as simulações realizadas.	70
Tabela 4.15: Resultados obtidos por meio dos modelos teóricos de dosagem para a matriz AR410 e para as simulações realizadas.	70
Tabela 4.16: Valores de espalhamento para as misturas produzidas com adição de fibras.	73
Tabela 4.17: Resultados médios das propriedades em tração dos compósitos da matriz AR300 reforçados com juta e desvio padrão.	74
Tabela 4.18: Espaçamento e abertura de fissuras dos compósitos reforçados com 3% de fibras alcalinas na matriz AR300.	76
Tabela 4.19: Espaçamento e abertura de fissuras dos compósitos reforçados com 4% de fibras alcalinas na matriz AR300.	77
Tabela 4.20: Resultados médios das propriedades em tração dos compósitos da matriz AR410 reforçados com juta e desvio padrão.	78

Tabela 4.21: Cálculo de espaçamento e abertura de fissuras do compósito representativo do grupo de 3% de fibras alcalinas na matriz AR410.	79
Tabela 4.22: Cálculo de espaçamento e abertura de fissuras do compósito representativo do grupo de 4% de fibras alcalinas na matriz AR410.	81
Tabela 4.23: Resultados médios das propriedades em flexão dos compósitos da matriz AR300 reforçados com juta e desvio padrão.....	82
Tabela 4.24: Cálculo de espaçamento e abertura de fissuras do compósito representativo do grupo de 3% de fibras na matriz AR300.	83
Tabela 4.25: Cálculo de espaçamento e abertura de fissuras do compósito representativo do grupo de 4% de fibras alcalinas na matriz AR300.	84
Tabela 4.26: Resultados médios das propriedades em flexão dos compósitos da matriz AR410 reforçados com juta e desvio padrão.....	87
Tabela 4.27: Cálculo de espaçamento e abertura de fissuras do compósito representativo do grupo de 3% de fibras alcalinas na matriz AR410.	87
Tabela 4.28: Cálculo de espaçamento e abertura de fissuras do compósito representativo do grupo de 3% de fibras alcalinas na matriz AR410.	88
Tabela 4.29: Cálculo de espaçamento e abertura de fissuras do compósito representativo do grupo de 4% de fibras na matriz AR410.	89

1 INTRODUÇÃO

1.1 MOTIVAÇÃO DO TRABALHO

A utilização de materiais compósitos com endurecimento na tração direta na indústria da construção tem despertado muito interesse nos últimos anos devido à capacidade de deformação que tem esses materiais, que apresentam mecanismos de falha dúctil com grande dissipação de energia, o que é útil em diversas aplicações de engenharia (principalmente problemas de deformação imposta). Fibras de PVA são normalmente utilizadas, ainda que tenham maior custo e apresentem um maior impacto ambiental. Em contraposição, existe em várias partes do mundo e, em particular, no Brasil, grande disponibilidade de fibras vegetais, que além de baixo custo também geram menor impacto ambiental e possuem grande potencial para uso como reforço em materiais compósitos.

O uso de modelos micromecânicos por apresentarem uma base teórica sólida que explicam as relações entre tensões e deformações em compósitos cimentícios (LEUNG, *et.al*, 1991), abriram novas possibilidades para a obtenção de materiais com múltipla fissuração na tração e na flexão, conhecidos como materiais compósitos denominados internacionalmente de "*Strain Hardening Cementitious Composites (SHCC)*".

Os primeiros estudos com *SHCC*, desenvolvidos nas últimas décadas do século XX, estavam baseados na utilização de fibras sintéticas (LEUNG, *et.al*, 1991). No entanto, recentemente, as iniciativas para a construção de um ambiente sustentável motivaram a utilização de fibras naturais em compósitos cimentícios que apresentem comportamento de endurecimento na tração direta, visando a geração de mecanismos de ductilidade como os presentes em um *SHCC*. Os estudos sobre utilização de fibras vegetais como reforço em compósitos cimentícios têm se desenvolvido e os trabalhos mostram resultados promissores em relação ao ganho de tenacidade e resistência pós-fissuração, principalmente na flexão, (TOLEDO FILHO, 1997; LIMA, 2004; MELO FILHO, 2012). Estudos realizados por FERREIRA (2012) usando fibras de sisal evidenciaram a geração de múltiplas fissuras também na tração. SOLTAN (2017) também obteve resultados com múltipla fissuração na tração usando fibras de curauá, dosando os compósitos mediante um estudo paramétrico.

A utilização de modelos micromecânicos aplicados em fibras naturais constituem a principal motivação deste trabalho. A única experiência recente registrada abordando esse tema foi a apresentada por ZUKOWSKI (2017) para fibras de curauá, considerando a caracterização das propriedades físicas e mecânicas da fibra natural, assim como as propriedades mecânicas da matriz e destacando a utilização de tratamentos superficiais na fibra para melhorar a aderência fibra-matriz.

Esta pesquisa faz uma extensão do estudo realizado por ZUKOWSKI (2017), porém utilizando fibras de juta como reforço em compósitos cimentícios, com propriedades físicas e mecânicas diferentes àquelas da fibra de curauá, e com um grande potencial de utilização devido à disponibilidade regional. O potencial da fibra de juta está relacionado ao fato de em relação as demais fibras vegetais, ela apresentar menor valor de área, tornando melhor a relação de aspecto, além do fato de a mesma apresentar melhorias em ambientes saturados e também melhor comportamento mecânico quando tratadas com hidróxido de cálcio (CaOH_2) (FERREIRA, 2016).

A validação de um modelo micromecânico utilizado para fibras sintéticas tomando como base o comportamento mecânico de fibras vegetais representa uma melhoria no grau de refinamento no processo de dosagem dos compósitos, trazendo benefícios aos processos utilizados atualmente, visto que com a modelagem o processo de dosagem dos compósitos não se baseia em tentativa e erro.

Diante do exposto, existem boas expectativas sobre a produção de SHCC mediante a utilização de fibras vegetais. O desempenho mecânico diferenciado do SHCC bem como a grande disponibilidade, bom comportamento mecânico das fibras vegetais e sua utilização como reforço motivaram a realização dessa pesquisa. Para realização deste trabalho foram produzidos compósitos cimentícios reforçados com fibras de juta, utilizando ferramentas que visam otimizar propriedades da fibra e da matriz, como a aplicação de modelo micromecânico desenvolvido por LEUNG e LI (1991).

1.2 OBJETIVOS

O objetivo geral desse trabalho foi o desenvolvimento de compósitos cimentícios reforçados com fibras de juta a fim de que esses materiais apresentassem comportamento de endurecimento na tração direta, utilizando um modelo micromecânico de dosagem como ferramenta para obtenção de tal fim.

Os objetivos específicos foram:

- Melhoria das propriedades físicas e mecânicas das fibras de juta por meio de tratamentos superficiais;
- Melhoria da interface fibra-matriz de forma a obter maior aderência da fibra com as matrizes cimentícias estudadas;
- Determinação do volume crítico de fibras necessário para produção de *SHCC* nos compósitos por meio do desenvolvimento de modelos micromecânicos de dosagem para as fibras de juta com três diferentes matrizes utilizadas no trabalho;
- Validação do modelo micromecânico por meio de ensaios mecânicos de tração e flexão dos compósitos produzidos.

1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Este trabalho é composto de 5 capítulos:

- Capítulo 1: Introdução ao tema, frisando a importância e a motivação do estudo, os objetivos e a organização do trabalho;
- Capítulo 2: Revisão bibliográfica sobre fibras vegetais, compósitos cimentícios reforçados com fibras com endurecimento na tração direta, e sobre o modelo micromecânico de dosagem;
- Capítulo 3: Apresentação da caracterização dos materiais empregados, bem como os métodos experimentais utilizados na produção e avaliação das propriedades dos compósitos, além da metodologia de tratamento aplicado nas fibras e os correspondentes procedimentos experimentais para avaliação do mesmo;
- Capítulo 4: Tratamento e análise dos resultados obtidos experimentalmente;
- Capítulo 5: Conclusões do estudo realizado e sugestões para trabalhos futuros.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 FIBRA VEGETAL

2.1.1 INTRODUÇÃO

A utilização das fibras naturais como reforço em compósitos apresenta vantagens em relação as fibras sintéticas, como por exemplo: biodegradabilidade, baixo custo, baixa densidade, boa tenacidade, boas propriedades térmicas e baixo conteúdo energético (SILVA *et al.*, 2004).

As fibras naturais são subdivididas de acordo com sua origem: vegetais como linho, cânhamo, coco, piaçava; animal como a lã, e mineral como asbestos e mica. Na linha de desenvolvimento de novos materiais de construção sustentáveis, as fibras vegetais são largamente utilizadas e estudadas em sistemas baseados em cimento para aplicações estruturais. Além disso, dentro das fibras vegetais pode-se definir uma classificação adicional dependendo de suas origens: das gramíneas (bambu), do fruto (coco), da folha (curauá, sisal, banana) e do caule (juta, cânhamo, linho). Propriedades como resistência a tração, alongamento e módulo de elasticidade podem variar de acordo com a parte de onde a planta é proveniente (DEFOIRDT *et al.*, 2010).

Em relação à morfologia, a fibra natural é uma combinação de fibrilas com estrutura em camadas (parede celular primária e parede secundária dividida em três camadas ao redor do lúmen). As células da fibra são mantidas unidas por uma estrutura de fibra denominada lamela média. A camada média das paredes celulares secundárias determina as propriedades mecânicas da fibra (a resistência da fibra está relacionada ao ângulo microfibrilar e o teor de celulose). O ângulo microfibrilar é o ângulo entre o eixo da fibra e as microfibrilas. Quanto menor o ângulo, maior a força e a rigidez, e quanto maior o ângulo maior é a ductilidade (DEFOIRDT *et al.*, 2010). Na Figura 2.1 é apresentada a estrutura de uma fibra natural.

Apesar das fibras naturais apresentarem mesma estrutura celular (paredes celulares, lamela média e lúmens), apresentam diferenças quanto à área transversal total, espessura das paredes celulares, quantidade e área de lumens. Esses fatores afetam a resistência mecânica das fibras (FIDELIS, 2014). A Figura 2.2 mostra que em algumas fibras é possível ter o lúmen mais visível (sisal), enquanto outras (curauá) apresentam uma estrutura um pouco mais dispersa.

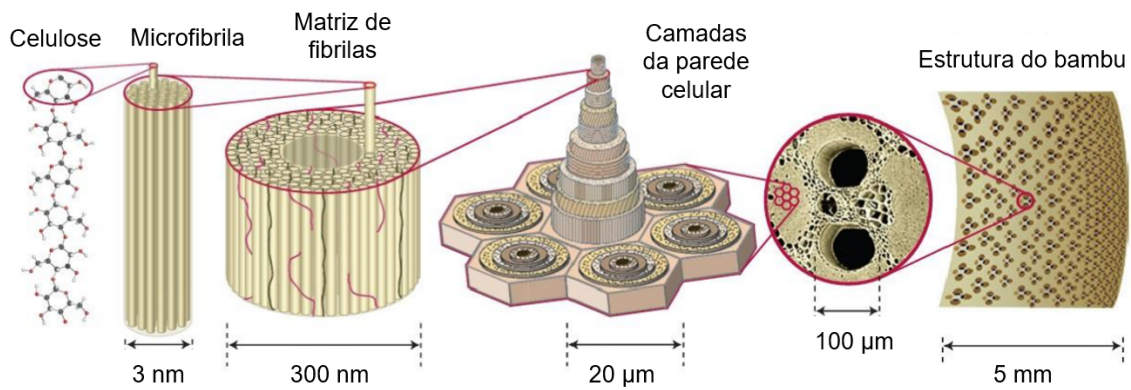


Figura 2.1: Descrição de uma fibra natural de bambu (Adaptada de WEGST *et al.*, 2015).

DITTENBER E GANGARAO (2012) afirmam que o processo de extração pode deformar a fibra. Além da forma como as fibras são extraídas, as condições ambientais de cultivo (localização, clima e insolação), a colheita (planta inteira ou folhas selecionadas), as condições de fornecimento e transporte (condições de armazenamento, idade da fibra) são fatores que afetam a qualidade da fibra.

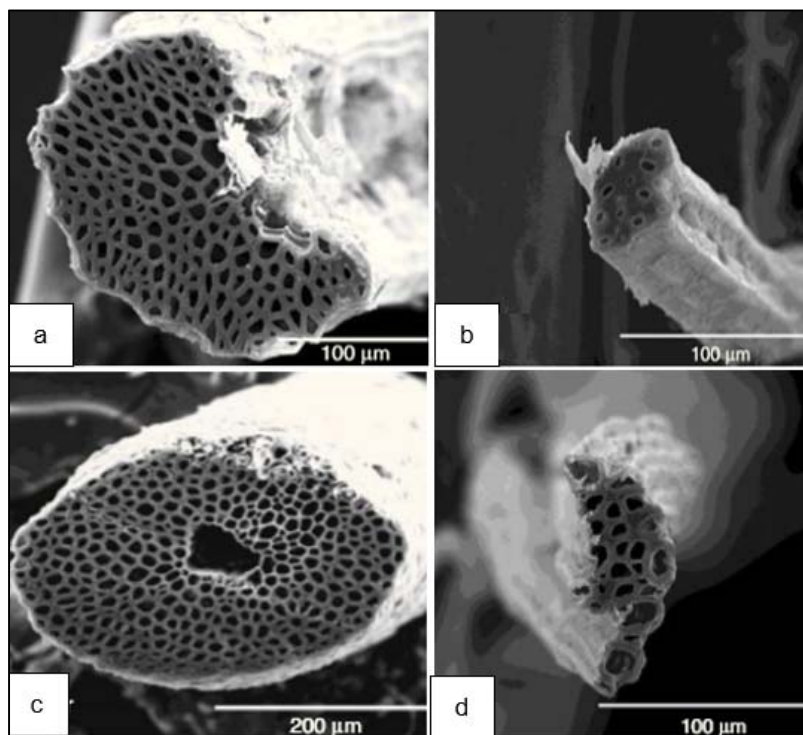


Figura 2.2: Micrografia das fibras de (a) sisal, (b) curauá, (c) coco e (d) juta (FIDELIS *et al.*, 2013).

Em relação à composição química, fibras naturais são compostas principalmente de celulose, lignina e hemicelulose. Outros componentes são pectina, óleo e ceras (JOHN e THOMAS, 2008). A fotossíntese das folhas é responsável pela

formação de todos os componentes químicos (SWAMY, 1998). A Tabela 2.1 apresenta a composição química de algumas fibras vegetais.

Tabela 2.1: Composição química de fibras vegetais (FIDELIS, 2014).

Fibras	Celulose (%)	Hemicelulose (%)	Lignina (%)
Sisal	59,5	18,4	11,9
Juta	72,0	12,8	8,1
Curauá	59,4	19,1	14,4

A celulose, polímero natural construída com carbono, hidrogênio e oxigênio, é o mais importante componente estrutural da fibra natural. É resistente aos álcalis, ácidos diluídos e agentes oxidantes, mas é suscetível a tratamentos químicos. Quanto maior a quantidade de celulose na fibra, maior é a resistência à tração e o módulo de elasticidade da fibra (YOUNG *et al.*, 1998).

Hemiceluloses são polissacarídeos de peso molecular inferiores, e eles são um fator de cimentação entre microfibrilhas de celulose (AZWA *et al.*, 2013). Hemicelulose é solúvel em álcalis e apresenta uma grande capacidade de absorção de água. Hemicelulose tem estrutura amorfa e é propensa à degradação por ácidos diluídos e alcalinos (JACOBSEN e WYMAN, 2000).

A lignina é um polímero de hidrocarboneto complexa e é responsável pela rigidez da planta (ligação entre as células) e transporte (tem natureza hidrofóbica) de água. Lignina é também responsável pela cor amarelada e não contribui na resistência de fibras. No entanto, é resistente à maioria dos ataques de microorganismos. É solúvel em soluções de álcalis e pode ser removida no processo de branqueamento (BENTUR e MINDESS, 2007).

A função da cera e do óleo é a proteção das fibras e elas estão presentes na superfície da fibra (WONG *et al.*, 2010). Eles podem ser removidos com impurezas presentes na superfície da fibra por imersão em solução de álcalis (TOLEDO FILHO *et al.*, 2000).

Em relação às propriedades mecânicas SILVA *et al.* (2008) afirmam que essas propriedades variam entre as diferentes fibras vegetais. Algumas fibras são consideradas de baixo desempenho quando a resistência à tração é baixa (abaixo de 600 MPa), e outras são consideradas de alto desempenho, quando apresentam alta resistência à tração (acima de 600 MPa). Neste caso, as fibras apresentam melhor

possibilidade de atuarem como reforço em compósitos cimentícios. A Tabela 2.2 mostra algumas propriedades físicas e mecânicas de algumas fibras naturais e das fibras sintéticas de PVA e aço para efeito de comparação.

Tabela 2.2: Propriedades gerais de fibras.

Fibras	Resistência à Tração (MPa)	Módulo de elasticidade (GPa)	Deformação (%)	Referência
Coco	55 - 125	2,6	18,8	FIDELIS, 2014
Bamboo	720-910	33	2,9	DEFOIRT <i>et al.</i> , 2010
Juta	310-488	26	1,6	DERFOIRT <i>et al.</i> , 2010
Sisal	230-860	17	2,8	SILVA <i>et al.</i> , 2008
Curauá	490-770	38	2,1	FERREIRA, 2016
PVA	1200-1600	40	7	OLIVEIRA, 2015; KURARAY COMPANY 2014
Aço	1050-2000	210	-	SAHIN E KOKSAL

Características como a resistência à tração evidenciam que a fibra de aço tem uma capacidade bem maior quando comparada às fibras naturais, no entanto as fibras de PVA não estão tão acima, logo existe a possibilidade de utilização das fibras vegetais como alternativa para substituição dessa fibra sintética na produção de compósitos cimentícios (ZUKOWSKI, 2017). Além disso, as propriedades mecânicas podem ser melhoradas através de tratamentos superficiais (FERREIRA, 2016).

2.1.2 FIBRA DE JUTA

Juta é a denominação atribuída às fibras que são extraídas de plantas do gênero *Corchorus* e família *Tiliaceae*. No mundo se tem conhecimento da existência de aproximadamente quarenta espécies desta fibra, sendo que apenas são cultivadas as espécies *C.capsularis* (juta branca) e *C.olitorius*. No Brasil, o plantio da juta é realizado sobre as margens dos rios Solimões e Amazonas, no início da maré. A dificuldade da prática do cultivo permanente dessas plantas está associada ao fato de as regiões de cultivo apresentarem ciclo anual de 14 inundações, o que impede o crescimento de florestas naturais. A fibra de juta é extraída do caule da planta pelos processos de corte, trituração, secagem, embalagem e classificação (RAHMAN, 2010). Dentre as principais aplicações das fibras de juta se destacam a utilização desse material como embalagens, revestimentos, artesanato, entre outros.

A Figura 2.3 mostra o processo de extração da fibra, e a aparência da fibra após a extração.



Figura 2.3: Processo de extração da fibra de juta: (a) corte manual, (b) lavagem da fibra, (c) secagem da fibra (Revista Globo Rural, 2010).

Algumas propriedades físicas e mecânicas da fibra de juta são apresentadas na Tabela 2.3.

Tabela 2.3: Propriedades físicas e químicas da fibra de juta.

Fibra	Densidade (g/cm ³)	Resistência à Tração (MPa)	Módulo de elasticidade (GPa)	Deformação (%)	Referência
Juta	1,39 (0,05)	399 (89)	26	1,6 (0,3)	DERFOIT <i>et al.</i> , 2010
	-	314 (131)	35,2 (15,1)	0,9 (0,3)	FIDELIS, 2014

A morfologia do filamento de juta apresenta grande variabilidade quanto à espessura das paredes celulares, número e diâmetro dos lumens (FIDELIS, 2014), como pode ser observado na Figura 2.4.

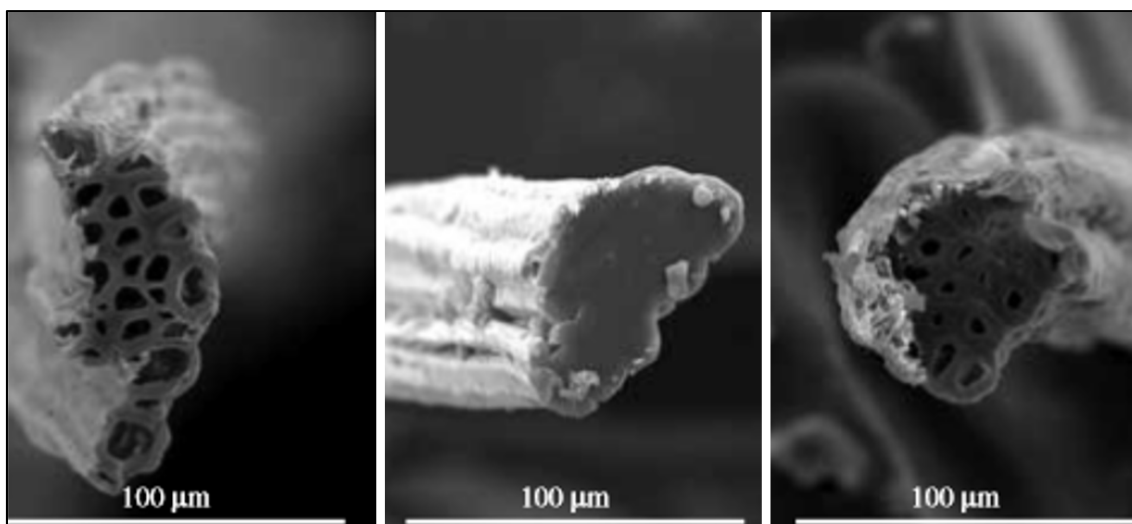


Figura 2.4: Diferentes morfologias da fibra de juta (FIDELIS, 2014).

2.1.3 COMPARAÇÃO DAS PROPRIEDADES DAS FIBRAS VEGETAIS

Ainda que as fibras naturais apresentem estrutura celular padrão, as mesmas apresentam diferenças em alguns aspectos como por exemplo a área da seção transversal total e real (considerando a subtração da área dos lúmens), o número de fibrocélulas e a espessura das paredes celulares. A Tabela 2.4 apresenta valores para comparação de algumas características de três diferentes fibras naturais.

Tabela 2.4: Área e diâmetro de lumens, quantidade e espessura de fibrocélulas (FIDELIS, 2014).

Fibras (40mm)	Área lumens (μm^2)	Espessura da parede fibrocelular (μm)	Diâmetro dos lumens (μm)	Quantidade de fibrocélulas	Área Real (mm^2)	Área total (mm^2)
Curauá	162,2	3,5	4	12	0,003838	0,004
Juta	1014,1	2,5	6,7	26	0,002986	0,004
Sisal	5796,9	2,6	8,2	144	0,017203	0,023

Comparativamente às fibras de curauá e de juta, a fibra de sisal apresentou área total maior, sendo composta por um número maior de lumens. As paredes celulares do sisal são mais espessas que as do curauá (FIDELIS, 2014). O sisal teve a segunda maior resistência a tração, como mostra a Tabela 2.5.

A partir dos dados apresentados na Tabela 2.4 e Tabela 2.5, é possível perceber que a fibra de curauá, com menor área de lumens e com uma espessura de parede celular maior, apresentou a maior resistência à tração. Já as fibras de sisal e

juta, possuem similaridade na espessura de parede celular, mas possíveis diferenças na composição química fazem com que o comportamento mecânico seja bem diferenciado entre as duas, considerando que a resistência à tração das fibras de sisal é aproximadamente o dobro da evidenciada em fibras de juta (FIDELIS, 2014).

Tabela 2.5: Resultados do ensaio a tração para as fibras de curauá, juta e sisal (FIDELIS, 2014).

Fibras (40mm)	Resistência à Tração (MPa)	Módulo de elasticidade (GPa)	Deformação (%)	Área (mm²)
Curauá	543 (260)	63,7 (32,5)	1,0 (0,2)	0004 (0,002)
Juta	249 (89)	43,9 (12,3)	0,6 (0,2)	0,004 (0,001)
Sisal	484 (135)	19,5 (4,5)	3,3 (1,6)	0,023 (0,007)

2.1.4 TRATAMENTOS SUPERFICIAIS

Diversos tratamentos físico-químicos para fibras naturais têm sido estudados com o objetivo de se melhorar as propriedades mecânicas das fibras e a interação fibra matriz. Os tratamentos químicos atuam em forma de moléculas com duas funções básicas. A primeira delas é a reação com grupos hidroxilos presentes na celulose da fibra, enquanto que uma segunda função é a reação com grupos funcionais da matriz (PANDEY *et al.*, 2010).

No caso de fibras naturais, alguns tratamentos foram estudados pelo autor FERREIRA (2016) para reduzir o impacto de uma baixa ligação química e a alta capacidade de absorção de água que causa instabilidade volumétrica. Segundo o autor, esta instabilidade volumétrica resulta numa perda de contato físico da matriz com as fibras o que danifica a zona de transição interfacial.

O trabalho de SPINACÉ *et al.* (2009) avaliou a influência de três tratamentos aplicados em fibras de curauá sobre as propriedades físicas, químicas e mecânicas das fibras. O primeiro tratamento consistiu em uma lavagem convencional a uma temperatura de 80°C durante 1 hora, com água fria da torneira. Um segundo tratamento aplicado foi a imersão em uma solução de hipoclorito de sódio durante 5 horas, sendo depois lavadas com água da torneira. Nesses dois tratamentos, as fibras finalmente foram secas em atmosfera aberta a 25°C durante 48 horas e em seguida em um forno a 60°C durante 12 horas, sem exposição direta ao sol. Um terceiro tratamento avaliado consistiu em colocar o grupo de fibras em contato com plasma de oxigênio frio em um reator de quartzo. Os resultados obtidos associados às

propriedades mecânicas mostraram que no caso dos tratamentos com solução de hipoclorito de sódio e com plasma de oxigênio houve uma pequena diminuição da resistência à tração assim como do módulo de elasticidade. Já no caso do primeiro tratamento, os resultados mostraram uma diminuição maior da resistência a tração, mas um acréscimo importante na capacidade de deformação da fibra.

Neste trabalho optou-se por analisar o efeito da hornificação em água e da hornificação alcalina nas fibras de juta em função dos resultados observados nas pesquisas de ZUKOWSKI (2017) e FERREIRA (2016).

ZUKOWSKI (2017) realizou tratamentos de hornificação em água quente em fibras de curauá com 3 e 6 ciclos de 3 horas de imersão em água quente (aproximadamente 80°C) seguidos de 24 horas em um processo de secagem em estufa a 40°C. Este tratamento permitiu diminuição da área da seção transversal e, em relação às propriedades mecânicas, houve um acréscimo da resistência à tração e do módulo de elasticidade.

Mais uma avaliação feita por ZUKOWSKI (2017) consistiu em submeter esse mesmo grupo de fibras ao tratamento alcalino, sendo imersas durante 60 minutos em solução a 1% de hidróxido de cálcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$). Segundo SAHA *et al.* (2010), tratamentos alcalinos com tempos de exposição entre 30 e 60 minutos e concentrações em volume entre 0,5 e 1% se encontram dentro de valores permissíveis para evitar a degradação da fibra vegetal.

FERREIRA (2016) verificou o efeito de diferentes tratamentos superficiais para fibras de juta com 25mm de comprimento. Um dos tratamentos foi o de hornificação em água por meio de ciclos de molhagem e secagem. Neste tratamento as fibras passavam por um pré-tratamento de lavagem em água quente a 80°C durante 1 hora, seguido de secagem em ambiente controlado a 40°C durante 5 horas. Após o pré-tratamento as fibras foram submetidas a 10 ciclos de hornificação em água, que consistiram em deixar as fibras imersas durante 3 horas a temperatura ambiente ($T=22^\circ\text{C}$), seguido de 16 horas de secagem em estufa a 80°C. Os resultados evidenciaram um ganho tanto na capacidade de resistência à tração (543 MPa para 10 ciclos em relação à 249 MPa sem tratamento), assim como da capacidade de deformação, mantendo o módulo de elasticidade praticamente invariante.

FERREIRA (2016) também verificou o comportamento das fibras de juta submetidas a tratamento alcalino. As fibras de juta foram submetidas a 1, 5 e 10 ciclos

de imersão em 0,73% de solução de Ca(OH)_2 em uma temperatura controlada de 21°C durante 50 minutos. As fibras com tratamento alcalino não foram lavadas para manter o excesso de álcali na superfície da fibra. Após disso, as fibras foram secas em ambiente controlado a uma temperatura de 40°C durante 24 horas.

Os resultados de FERREIRA (2016) para fibras tratadas em meio alcalino mostram uma melhoria das propriedades mecânicas para 1 ciclo de hornificação, atingindo uma resistência à tração de aproximadamente 700 MPa, aumentando também seu módulo de elasticidade e sua capacidade de deformação. FERREIRA (2016) atribuiu esse resultado à remoção de materiais não celulósicos e impurezas que permanecem distribuídas na região interfibrilar das fibras da juta, por meio da hornificação alcalina. Após o tratamento alcalino de baixa concentração, as fibrilas tornam-se mais capazes de se rearranjar ao longo das direções de deformação por tensão, uma vez que a região interfibrilar é menos densa e menos rígida devido à remoção de hemicelulose. Em comparação com outras fibras, como as de sisal e curauá, FERREIRA (2016) observou que aparentemente a fibra de juta apresentou uma maior interação com hidróxido de cálcio. As fibras de juta obtiveram maior quantidade de partículas de carbonato de cálcio em sua superfície, desde o primeiro até o quinto ciclo alcalino a que foram submetidas, devido à afinidade química da celulose com o Ca(OH)_2 . As análises cristalinas feitas por meio de caracterização por difração de raios-x (DRX), feitas pelo mesmo autor, indicaram a juta como a fibra de maior grau de cristalinidade, corroborando com a interação.

2.2 COMPÓSITOS CIMENTÍCIOS COM ENDURECIMENTO NA TRAÇÃO DIRETA (*SHCC*)

2.2.1 HISTÓRICO DE MATERIAIS COMPÓSITOS COM FIBRAS

Os primeiros trabalhos associados ao estudo do comportamento mecânico de materiais cimentícios reforçados com fibras começaram nos anos 60. Entre os primeiros estudos, se destaca o apresentado por ROMUALDI e MANDEL (1964), que avaliaram a influência da distribuição aleatória de fibras de aço de comprimento curto em corpos de prova de concreto submetidos à tração indireta e à flexão, estabelecendo relações entre a resistência à tração com o espaçamento das fissuras, assim como a avaliação dos mecanismos de fissuração em uma distribuição aleatória das fibras.

KRENCHER (1964) apresentou em sua dissertação um estudo teórico e experimental sobre a elasticidade em concretos reforçados com fibras de aço. Posteriormente, DE VEKEY e MAJUMDAR (1968) estudaram a resistência na zona de interface entre a fibra e a matriz, mediante ensaios de arrancamento em corpos de prova com fibras de vidro e fibras de aço.

MAJUMDAR (1970) apresentou estudos no uso de fibras de vidro em materiais cimentícios, destacando a resistência da matriz fissurada em valores de deformações inferiores aos da fibra, evidenciando a geração de mecanismos dúcteis de deformação com a inclusão de fibras no compósito.

AVESTON e KELLY (1972) mostraram um estudo teórico das relações tensão-deformação em materiais compósitos a base de cimento, estabelecendo expressões no regime de fissuração, considerando tensões cisalhantes na interface fibra-matriz, assim como a abertura de fissuras, desenvolvendo expressões para o cálculo da energia de fissuração e a abertura teórica de fissuras em compósitos com fibras dispostas em forma isotrópicas em duas e três dimensões.

O trabalho apresentado por NAAMAN *et al.* (1974) mostra o desenvolvimento de um modelo probabilístico para simular o comportamento do concreto reforçado com fibras submetido à tração. Mais tarde, KASPARKIEWICZ (1978) mencionou pela primeira vez o termo *strain hardening* para fazer referência aos compósitos cimentícios com endurecimento na tração. O programa experimental esteve caracterizado por ensaios a tração em amostras contendo fibras de aço de 25mm de comprimento alinhadas à matriz. Os resultados obtidos evidenciaram um mecanismo de fratura com múltiplas fissuras, incrementando o nível de deformações para tensões de tração mais ou menos constantes.

O desempenho após a formação da primeira fissura em compósitos cimentícios reforçados com fibras submetidos a ensaios de tração direta, pode ser classificado de acordo com o comportamento da curva tensão-deformação do material como *strain hardening* ou *strain softening* (Figura 2.5). Os compósitos de tipo *strain softening* apresentam um comportamento de amolecimento na região de fissuração, além de a resistência na região pós-fissuração ser inferior à resistência de primeira fissura. No caso de compósitos com comportamento *strain hardening* submetidos a ensaios de tração direta, o comportamento é caracterizado pela manutenção e inclusive aumento da tensão na região pós fissuração, na medida que a deformação aumenta,

consequentemente havendo formação de múltiplas fissuras com aberturas inferiores a 100 μ m (NAAMAN e REINHARDT, 2006).

O desempenho de compósitos cimentícios reforçados com fibras submetidos a ensaios de flexão é classificado em *deflection softening* e *deflection hardening* (Figura 2.5) de acordo com o comportamento do material na região de fissuração em uma curva tensão-deslocamento.. É importante destacar que os compósitos com comportamento *strain hardening* também possuem um comportamento de *deflection hardening*. Já no caso de compósitos de tipo *strain softening*, é possível que na flexão tenham um comportamento de *deflection hardening* ou *deflection softening* (NAAMAN e REINHARDT, 2006).

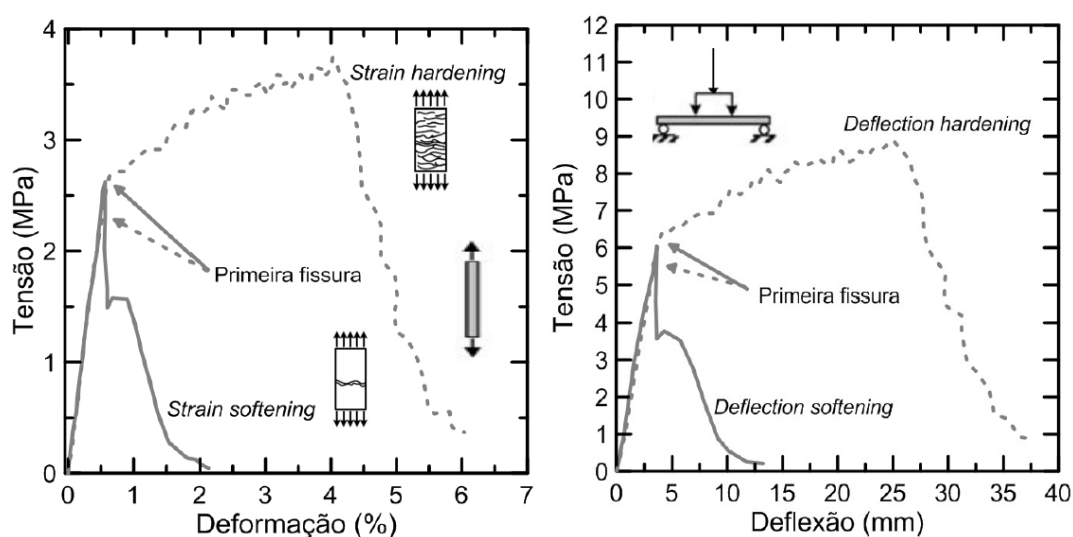


Figura 2.5: Comportamento de compósitos reforçados com fibras submetidos a ensaios de tração direta (esquerda) e flexão (direita) (adaptada de NAAMAN e REINHARDT, 2006).

2.2.2 MATRIZES DE SHCC

O comportamento de compósitos cimentícios com endurecimento na tração direta é baseado na combinação de uma boa capacidade de deformação em conjunto com um ganho progressivo de resistência à tração. A geração de mecanismos de ductilidade capazes de oferecer esse comportamento é oferecida pela interação da matriz cimentícia com a fibra que constitui o compósito. Nesse sentido, a energia de fratura da matriz deve ser tal que a geração das múltiplas fissuras ocorra em forma controlada, mesmo antes do arrancamento ou ruptura das fibras.

Em relação às matrizes cimentícias, existe um conjunto de fatores que define um bom comportamento para a produção de SHCC. O estudo das relações entre o

comportamento mecânico macroscópico do compósito a partir da microestrutura dos materiais constitutivos tem permitido avanços importantes no desenvolvimento de compósitos cimentícios de alto desempenho. LI (2003) destaca que o uso de conceitos da micromecânica pode ser muito útil para guiar a combinação dos diferentes constituintes das matrizes de SHCC, assim como otimizar o desempenho mecânico dos compósitos.

Matrizes de SHCC possuem teor de cimento cerca de duas a três vezes maior que o concreto convencional e isso se justifica pelo fato de esse aglomerante contribuir com o controle da reologia do compósito facilitando a dispersão das fibras, além do fato de ele também contribuir com o controle da tenacidade da matriz, um dos principais critérios que caracterizam o comportamento *strain hardening* do compósito (MAGALHÃES, 2010).

Os agregados cumprem diversas funções nos materiais cimentícios, a mais comum é a redução de custos no concreto devido ao fato de haver introdução de agregados aumentar o volume do concreto sem afetar a resistência. Porém, nem todo tipo de agregado é favorável na produção de SHCC. Um dos aspectos comuns neste tipo de matriz é a ausência de agregados graúdos, tendo em vista que a sua presença nas matrizes impõe uma heterogeneidade responsável pela geração de mecanismos de falha frágil, contrária aos princípios de ductilidade característicos de SHCC (MAGALHÃES, 2010).

A presença de agregados dentro da matriz tende a modificar a tenacidade do compósito, devido a modificações na superfície de fratura (NALLTHAMBI *et al.*, 1984). O aumento da resistência à propagação de fissuras é proporcional ao aumento do tamanho de partículas, influenciando na escolha de agregados finos para a produção de compósitos de tipo SHCC.

Já no caso de agregados finos, do ponto de vista da mecânica da fratura, em matrizes frágeis como as cimentícias, a resistência à tração é função da maior fissura existente na matriz enquanto que a resistência à compressão depende de um conjunto maior de fissuras. A presença de agregados finos é interpretada como pequenas superfícies de fissura, é desejável a utilização de agregados finos com tamanho menor àquele das fissuras preexistentes na matriz (WANG e LI, 2003). Além disso, tamanhos menores de agregado favorecem a trabalhabilidade e favorecem uma boa dispersão das fibras.

A cinza volante foi recentemente incluída nas matrizes de *SHCC* devido a sua capacidade de melhoramento do compósito à tração, sendo capaz de manter ao longo do tempo uma capacidade de deformação em 3% (WANG e LI, 2007). O uso do cinza volante se deu por diversos motivos, dentre eles o fato de o aumento do teor de cinza volante tender a reduzir a aderência química na interface fibra-matriz e a tenacidade da matriz, ao mesmo tempo que aumenta a aderência friccional, além disso esse material também contribui na trabalhabilidade da mistura facilitando a uniformidade das fibras (MAGALHÃES, 2010).

No trabalho de WANG e LI (2007) foram desenvolvidos compósitos *SHCC* com adição de cinza volante (até 1,2 vezes a massa de cimento), evidenciando uma resposta mecânica com alta capacidade de deformação (3 a 4%) e resistência a tração com valores ao redor de 4,5 MPa. Devido ao alto volume de cinza volante, os índices de sustentabilidade do material foram melhorados, devido a menores emissões de dióxido de carbono, assim como baixos consumos de energia. Outro trabalho desenvolvido por YANG *et al.* (2007) mostrou a utilização de altos teores de cinza volante (1,2 a 5,6 vezes a massa de cimento), evidenciando melhorias de várias propriedades de *SHCC* (redução da abertura de fissura e da retração por secagem).

2.2.3 COMPÓSITOS REFORÇADOS COM FIBRAS VEGETAIS E TENTATIVAS DE *SHCC*

O uso de fibras vegetais como reforço em materiais compósitos cimentícios tem demonstrado ao longo dos anos um profundo interesse, motivado pela possibilidade de construir materiais de construção de baixo custo e com um impacto ambiental mínimo, sobretudo em lugares onde existe uma ampla variedade de fibras naturais, com origens diversos, e que demandam de engenheiros e construtores, habilidades e técnicas para produzir concretos reforçados com fibras naturais de ótima qualidade (AZIS *et al.*, 1981).

São muitas as experiências no uso de diferentes fibras vegetais como reforço de compósitos cimentícios, destacando o uso de casca de coco, sisal, bagaço de cana de açúcar, bambu e outros. Em relação a este trabalho de pesquisa, a utilização de fibra de juta em materiais cimentícios constitui o principal foco das atividades desenvolvidas baseado na motivação do trabalho e os objetivos detalhados na seção anterior.

Entre os primeiros estudos na utilização de fibra de juta como reforço em materiais com propósitos estruturais, pode ser citado o trabalho desenvolvido por MANSUR e AZIZ (1982), onde foram investigadas as propriedades mecânicas da pasta de cimento e argamassas quando reforçadas com fibra de juta, considerando variações no comprimento da fibra e com uma orientação aleatória. Além disso, diferentes conteúdos de fibra nos corpos de prova foram testados para avaliar a resistência à tração, compressão simples, flexão e impacto. Por meio dos resultados obtidos foi concluído que a inclusão de fibras de juta de curto comprimento permitiu um incremento substancial na resistência à tração, assim como flexão e impacto, destacando em forma qualitativa a existência de um limite de volume de fibra e de comprimento para não prejudicar a trabalhabilidade. O estudo também mostra que a presença de fibras influenciou pouco a resistência à compressão, e em consequência, o módulo de elasticidade dos compósitos.

Um dos aspectos questionados no uso de fibras vegetais é o relacionado com a durabilidade, devido ao fato que as fibras podem sofrer decomposição no ambiente alcalino da matriz cimentícia, resultando em um compósito frágil de pouca resistência. A partir dessa motivação, estudos foram conduzidos para avaliar em forma quantitativa a durabilidade de compósitos cimentícios submetidos a diversos ciclos de envelhecimento.

No caso de fibras de juta, o estudo apresentado por SERA *et al.* (1990) avaliou o envelhecimento de compósitos com substituição parcial do cimento Portland por sílica ativa e cinzas da casca de arroz, com o objetivo de reduzir a alcalinidade da matriz. Nesse sentido, os melhores resultados foram obtidos com substituição do cimento em 30% por cinzas de casca de arroz ou 40% de sílica ativa.

Buscando o entendimento de questões relativas à durabilidade e comportamento mecânico de compósitos reforçados com fibras curtas de sisal e coco, TOLEDO FILHO (1997) desenvolveu sua pesquisa utilizando um traço de 1:1:0,4 com mistura diversificadas, através de substituições de até 40% do cimento Portland por micro-sílica e escória. Foram adicionadas fibras com comprimentos nominais de 15, 25 e 50mm ao volume de 3% às misturas. De acordo com o autor, compósitos produzidos com fibras curtas de 15 e 25mm apresentaram propriedades mecânicas inferiores às dos compósitos produzidos com fibras de 50mm. No entanto, foram observados ganhos de tenacidade após o surgimento da primeira fissura.

No caso do Programa de Engenharia Civil (PEC-COPPE) da Universidade Federal do Rio de Janeiro são diversos os trabalhos associados ao estudo de materiais cimentícios reforçados com fibras. Nesse sentido, em 2004, LIMA estudou o comportamento mecânico de compósitos livres de hidróxido de cálcio reforçados com fibras vegetais. O autor utilizou 1, 2 e 3%, em relação à massa de materiais finos, de fibras de sisal com comprimento nominal de 25mm. Os compósitos reforçados com fibras curtas de sisal apresentaram o comportamento governado pela matriz até o surgimento da primeira fissura. Na região pós-fissuração, houve uma tensão brusca de resistência, com transferência de carga para as fibras. Foi possível observar, nessa região, o surgimento e abertura de uma única fissura, sendo que a carga foi reduzida até a ruptura, o que ocasionou arrancamento das fibras da matriz. Apesar disso, foram observados ganhos expressivos de tenacidade.

D'ALMEIDA *et al.* (2010) conseguiu obter bons resultados com a adição de fibras de curauá em matrizes livres de hidróxido de cálcio. A adição de 4% de fibras de 50mm proporcionou a formação de múltiplas fissuras nos compósitos quando submetidos a esforços de tração, obtendo, também, uma tensão última de 4,59 MPa e uma tenacidade de 2,13 kJ/m².

MELO FILHO (2012) adicionou 2, 4 e 6% de fibras curtas de sisal de 25 e 50mm em matrizes cimentícias. Foi utilizada uma matriz auto adensável composta por agregados com dimensão máxima de 1,18mm, o que possibilitou a moldagem de compósitos com frações volumétricas de 6% de fibras de sisal e comprimento de 25mm, permitindo ainda assim um comportamento reológico adequado. Nos compósitos, foram observados surgimento de múltiplas fissuras na flexão e valores de tenacidade na flexão (calculados até a deflexão de 20mm) de cerca de 3 kJ/m², ao serem submetidos a esforços mecânicos. As misturas também apresentaram bom comportamento sob cargas de tração direta, mostrando uma boa capacidade de transferir esforços, já que surgiram de uma a três fissuras durante o ensaio, embora não tenham apresentado endurecimento após o surgimento da primeira fissura.

O desenvolvimento de materiais reforçados com fibras vegetais curtas apresenta notáveis melhorias, devido à maior facilidade de dispersão das fibras na matriz, reduzindo custos devido ao fato de não haver necessidade de alinhamento do reforço. Comprimentos de fibras de até 50mm se apresentam como um atrativo principalmente por facilitar questões referentes a execução, dispersão e custo (FERREIRA, 2012).

Para que um material se torne um *ECC* é necessário que ele apresente melhorias em relação ao concreto convencional. Em termos de alta performance as melhorias estão relacionadas ao incremento de tenacidade, controle de fissuração e endurecimento acompanhado de um menor espaçamento de fissuras (FERREIRA, 2012).

FERREIRA (2012) produziu compósitos cimentícios reforçados com fibras curtas de sisal e afirmou, em relação ao comportamento mecânico dos compósitos, que os resultados indicam que as misturas com maior fração volumétrica (6%) e 50mm de comprimento apresentaram melhores resultados quando submetidos aos ensaios de flexão e tração direta, bem como melhor processo de fratura. Segundo o autor, os resultados indicaram que quanto maior o volume e comprimento das fibras, menores foram os valores de primeira fissura quando submetidos a esforços de flexão. Quanto ao ensaio de tração, o comportamento foi contrário. O processo de fratura das amostras com 4 e 6% foi de um padrão de múltipla fissuração, apresentando grande densidade de fissuras em ambas as amostras submetidas à flexão e um número de 3 a 5 fissuras nos ensaios de tração, sempre apresentando comportamento de endurecimento após o surgimento da primeira fissura. Quanto aos compósitos confeccionados com fibras tratadas (4 e 6% com 50mm de comprimento) o autor observou o surgimento de múltiplas fissuras, com uma densidade maior que as amostras sem tratamento, tanto na flexão como na tração, bem como um aumento na capacidade de absorção de energia e maior controle na abertura de fissuras.

ZUKOWSKI (2017) produziu compósitos cimentícios reforçados com fibras de 40mm de curauá que apresentaram comportamento *strain hardening*. Em seu procedimento primeiro foi avaliada a resistência à tração para fibras de diferentes comprimentos submetidas a dois tratamentos superficiais (hornificação em água e tratamento em solução alcalina). O tratamento alcalino reduziu a tensão de tração, a força de ruptura e a deformação em comparação com as fibras apenas hornificadas em água. Em relação ao módulo de elasticidade não se observou variação. Ainda que tenham reduzido os valores de algumas importantes propriedades, o tratamento alcalino visou, segundo o autor, a deposição de hidróxido de cálcio na superfície da fibra a fim de remover a hemicelulose e a lignina da parede da fibra e aumentar a rugosidade da superfície, melhorando assim a aderência dela com a matriz cimentícia. Ao fim dos tratamentos o autor concluiu ser o tratamento de hornificação em água, combinado com o tratamento alcalino o melhor tratamento para a fibra de curauá em matriz cimentícia.

Outros centros de pesquisa têm desenvolvido diversos estudos para a produção de compósitos cimentícios de tipo *SHCC* com fibras naturais. O trabalho de SNOECK *et al.* (2015) visou a utilização de fibras de linho com comprimento de 20mm para a produção de compósitos com propriedades auto cicatrizantes devido a geração de múltiplas fissuras em forma controlada. O procedimento considerou uma dosagem de 2% de fibras em volume para garantir uma boa trabalhabilidade, além da aplicação de vários tratamentos superficiais químicos com o objetivo de avaliar a sua influência no comportamento mecânico, caracterizado mediante ensaios de flexão em vigas, e destacando a eficiência desses tratamentos na geração de mecanismos de fissuração de tipo *deflection hardening*.

O estudo apresentado por SOLTAN *et al.* (2017) mostra um procedimento iterativo para calcular o volume crítico de fibras de curauá entre 10mm e 20mm de comprimento, obtendo valores similares aos obtidos por ZUKOWSKI (2017), sendo que além da utilização de ciclos de hornificação em água para tratamento das fibras, foi adicionado silano como agente de acoplamento na matriz. A partir disso, a interface fibra matriz foi melhorada e o comportamento de *strain hardening* foi evidenciado, destacando também o uso de microsíllica como melhorador da resistência a compressão e a tração, mas reduzindo a capacidade de deformação.

2.2.4 APLICAÇÕES DE *SHCC*

Materiais *SHCC* são materiais interessantes para prolongar a vida útil de estruturas como por exemplo usinas nucleares, usinas hidrelétricas, barragens e dutos para transporte de gases e líquidos, entre outras. Visto que a manutenção e reparo de estruturas de concreto apresentam elevado custo, a utilização do *SHCC* contribui com a redução de custos econômicos, sociais e ambientais de manutenção (OLIVEIRA, 2015).

No Japão, como exemplo de aplicação de *High Performance Fiber Reinforced Cementitious Composites* (HPFRCC), existem atenuadores de construção que são utilizados em edifícios de vários andares, como mostra a Figura 2.6. O amortecedor é uma coluna curta reforçada com material *SHCC*, que aumenta a segurança estrutural reduzindo a deriva do solo em caso de terremoto, por meio de sua capacidade de absorção de energia e capacidade de deformação sob cisalhamento (FUKUYAMA, 2006).

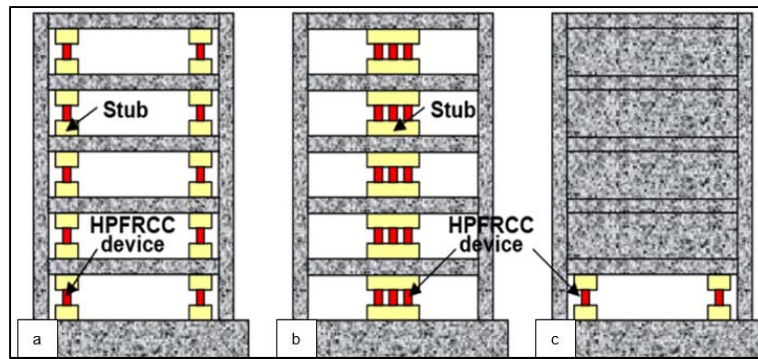


Figura 2.6: Exemplo de aplicação de material *SHCC* como amortecedor de construção em estruturas com risco de deriva por terremoto com (a) dispositivo aplicado no fim do vão, (b) vários dispositivos aplicados no centro do vão e (c) dispositivos aplicados no primeiro.

Em 2003 na cidade de Hiroshima (Japão) foram realizados reparos na barragem de Mitaka (ECC APPLICATIONS, 2017) como mostra a Figura 2.7.

O *SHCC* também foi utilizado em Hokkaido (Japão) para construção de um tabuleiro de uma ponte estaiada conforme apresentado na Figura 2.8 (ECC APPLICATIONS, 2017).

LEPECH E LI (2009) relatam sobre outro tabuleiro de ponte que também foi reparado com *SHCC* em Michigan (Estados Unidos). O reparo no tabuleiro é apresentado na Figura 2.9.



Figura 2.7: Barragem Mitaka (Japão) (a) visão geral, (b) superfície de concreto severamente danificada por fragmentações, fissuras e infiltrações e (c) reparo sendo executado com a utilização de *SHCC* projetado (ECC APPLICATIONS, 2017).

Material *SHCC* também pode ser usado na construção de canal de irrigação, já que ele é um revestimento estrutural altamente impermeável, o que melhora a durabilidade e a conservação da água. Além de poder ser facilmente reparado, caso seja danificado, através da pulverização da camada existente com uma nova, por meio de projeção do *SHCC* (LEPECH e LI, 2009). Como exemplo dessa aplicação (Figura 2.10), em Shiga (Japão), canais de irrigação de concreto apresentando deterioração,

problemas de exposição de agregados e fissuras foram reparados com *SHCC* projetado (ROKUGO *et al.*, 2006).



Figura 2.8: Tabuleiro de ponte estaiada em Hokkaido (Japão) utilizando o *SHCC* em sua construção (ECC APPLICATIONS, 2017).

Segundo KUNIEDA *et al.* (2004), o *SHCC* é também aplicado para proteger superfícies contra a carbonatação. A camada de *SHCC* pode ser usada quando materiais de revestimento de pintura são aplicados em estruturas reforçadas expostas a carbonatação, como por exemplo, os viadutos. Os materiais de revestimento de pintura são influenciados pela formação de fissuras no concreto. Quanto maior e mais profunda é a fissura, maior o risco de carbonatação. A função do *SHCC* é de formar uma camada protetora que aumente a durabilidade pelo controle da largura de fissuras e a capacidade de formação de múltiplas fissuras.



Figura 2.9: Aplicação de *SHCC* no reparo do tabuleiro de uma ponte em Michigan/Estados Unidos (LEPECH e LI, 2009).

Proteção contra a corrosão em barras de aço é uma aplicação do *SHCC*. Vigas reforçadas com camada desse material que é usado para proteger barras de aço da corrosão. O mecanismo de múltiplas fissuras pode impedir o esforço interno de progredir na corrosão, devido à formação de microcélulas em vez de macrocélulas e

uma proporção de ânodo/cátodo grande (Figura 2.11) (SOCIEDADE JAPONESA DE ENGENHARIA CIVIL, 2008).

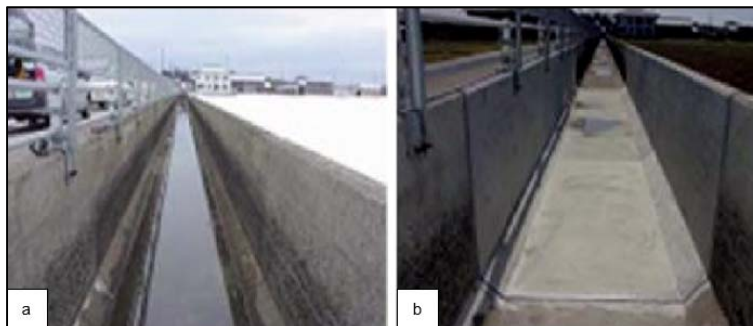


Figura 2.10: Aplicação de SHCC no canal de irrigação em Shiga (Japão), (a) antes e (b) depois da aplicação do SHCC (ROKUGO *et al.*, 2006).

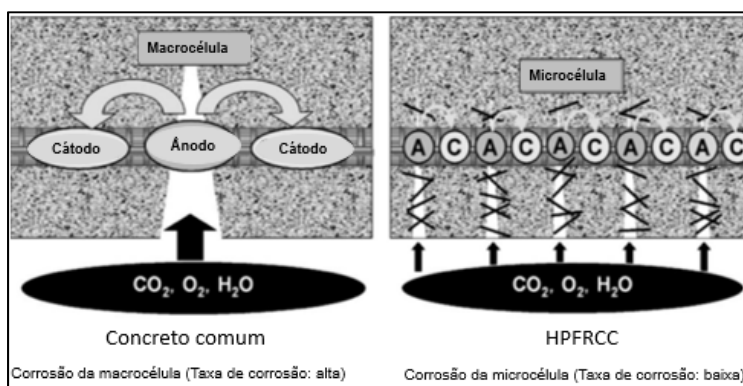


Figura 2.11: Diferenças de padrões de células de corrosão pelo modo de desenvolvimento de múltiplas fissuras (Adaptada da JAPAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS, 2008).

2.3 MODELO MICROMECAÂNICO

O comportamento de endurecimento na tração direta nos compósitos cimentícios reforçados com fibras têm sido estudado nos últimos anos mediante expressões teóricas baseadas na micromecânica, que permitiram estabelecer as relações entre tensões e deformações.

LEUNG e LI (1991) desenvolveram um modelo teórico para sustentar os mecanismos de arrancamento da fibra dentro das matrizes cimentícias, baseados na interação entre tensões axiais na fibra e tensões cisalhantes na interface fibra-matriz. Posteriormente, LI (1992) desenvolveu expressões para estabelecer relações entre força e deslocamento no regime prévio e após à fissuração em materiais compósitos reforçados com fibras sintéticas de comprimento curto. A resistência da primeira

fissura obtida é função de parâmetros associados à fibra, matriz e a propriedades da interface fibra-matriz.

Mais recentemente, ZUKOWSKI (2017) aplicou esse modelo micromecânico na produção de compósitos reforçados com fibras de curauá. A pesquisa desse autor comprovou que a metodologia, previamente projetada para fibras sintéticas, pode também ser aplicada às fibras naturais. O autor empregou tratamento em solução alcalina para melhoria das propriedades mecânicas das fibras. No caso da fibra de curauá, abordada em seu estudo, ZUKOWSKI (2017) observou que para fibras de 20mm de comprimento e matriz cimentícia com 1,75 MPa de resistência à tração, o volume crítico de fibras necessário para endurecimento seria acima de 7%, o que tornaria a reologia inviável. Ainda assim o autor investigou o comportamento mecânico de compósitos na tração para misturas de 2,4 e 6% com fibras de 20mm, constatando ser 4% o teor de fibras mais promissor. Diante disso, foram testados os comprimentos de 20, 40 e 50mm em compósitos com 4% de adição de fibras. Os resultados mostraram que os compósitos produzidos com fibras de 40mm apresentaram melhor padrão de múltiplas fissuras, em comparação aos que foram produzidos com fibras de 20mm, além de ser o grupo que apresentou maior tensão máxima até atingir 1% de deformação. Já os compósitos com 50mm de comprimento de fibras apresentaram maior resistência após a primeira fissura, porém não houve formação de múltiplas fissuras, além de esse grupo ter apresentado problemas em relação a trabalhabilidade da mistura.

Diante do exposto é possível observar que ainda que existam estudos avisando a aplicação de fibras vegetais como reforço em compósitos cimentícios, poucos trabalhos possuem como propósito a obtenção de materiais *SHCC*. Em adição, a literatura também relata apenas um estudo (ZUKOWSKI, 2017) aplicando modelo micromecânico para obtenção de compósitos *SHCC* com fibras vegetais, o que fundamenta o desenvolvimento desse trabalho.

3 PROGRAMA EXPERIMENTAL: MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 FIBRAS

A fibra de juta utilizada na pesquisa provém da região Amazônica. Esta fibra é extraída entre a casca e o talo interno da planta *Corchorus capsularis* por uma sequência de processos que consistem nas seguintes etapas: corte, maceração, desfibramento, secagem, enfardamento e classificação.

Antes de serem caracterizadas individualmente e introduzidas na matriz, para remoção de resíduos e impurezas, as fibras foram lavadas e mantidas submersas durante três horas em água quente (80°C) de acordo com o procedimento também utilizado por FERREIRA (2016), seguido de cinco horas de secagem na temperatura de 40°C (Figura 3.1 a e b). É relevante ressaltar que a temperatura de 80°C não danifica a fibra, já que a decomposição de hemiceluloses ocorre entre 200 e 300°C, e a degradação da celulose e da lignina ocorre entre 400 a 500°C (ARAÚJO *et al.*, 2008).

Uma vez secas, as fibras foram penteadas para alinhamento, em uma placa de madeira com pregos. Esse processo favoreceu o corte com uma guilhotina (Figura 3.1 c) nos comprimentos desejados facilitando a realização da caracterização e ensaios mecânicos individuais das fibras.



Figura 3.1: Preparação das fibras antes do tratamento: (a) lavagem, (b) secagem, (c) placa de madeiras com prego e guilhotina utilizadas para penteamento e corte das fibras.

3.1.1 TRATAMENTOS SUPERFICIAIS

Foram aplicados dois diferentes tratamentos superficiais nas fibras de juta, a fim de se determinar o melhor tratamento para aplicação em compósitos, segundo o processo utilizado por FERREIRA (2016). Um grupo de fibras foi submetido ao processo de hornificação em água por meio de 5 ciclos de molhagem e secagem. Cada ciclo consistiu na imersão das fibras em água a temperatura ambiente (25°C) por 3 horas, seguido de 16 horas de secagem em temperatura de 80°C. O outro grupo de fibras foi submetido a 1 ciclo de tratamento alcalino. Cada ciclo desse tratamento consistiu na imersão das fibras em solução alcalina saturada de hidróxido de cálcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), com água, 0,73% em volume, durante 50 minutos, seguido de 24 horas de secagem na temperatura de 40°C.

3.1.2 ANÁLISE MICROESTRUTURAL

As fibras foram caracterizadas por meio de análise microestrutural utilizando o microscópio eletrônico de varredura (MEV) TM 3000, do Laboratório de Técnicas Analíticas do Labest/COPPE/UFRJ. Para análise da superfície das fibras, estas foram previamente recobertas com ouro para se tornarem condutoras e mais adequadas à análise do MEV, que foi operado sob uma tensão de aceleração de 15 kV. Também foram obtidas imagens da seção transversal da fibra para obtenção da área medida no software ImageJ. A fim de minimizar a alteração na estrutura da fibra, as fibras foram cortadas com o auxílio de uma lâmina afiada, após imersas na solução de tratamento pelo tempo correspondente do tratamento.

3.1.3 ANÁLISE TERMOGRAVIMÉTRICA (TGA)

Foram realizadas análises termogravimétricas em amostras de fibras sem tratamento e tratadas em meio alcalino. As análises foram realizadas no equipamento modelo SDT Q600 TGA/DTA/DSC Simultâneo da TA Instruments do Laboratório de Técnicas Analíticas do Labest/COPPE/UFRJ. O equipamento operou a uma taxa de aquecimento de 10°C / min, da temperatura ambiente até aproximadamente 1000°C, em atmosfera de nitrogênio e fluxo do registrador de 100 mL/min. Os ensaios foram realizados em cadinhos de platina.

3.2 MATRIZ CIMENTÍCIA

3.2.1 CIMENTO PORTLAND, METACAULINITA E CINZA VOLANTE

Os materiais cimentícios empregados no desenvolvimento da matriz foram: cimento Mauá CP II F32, fabricado pela Lafarge Holcim; cinza volante, produzida pela POZOFLY, e metacaulinita da empresa Metacaulim do Brasil Indústria e Comércio Ltda.

O procedimento de caracterização dos materiais foi realizado no Laboratório de Técnicas Analíticas do Labest/COPPE/UFRJ. A composição química de cada material foi determinada por meio de análise por espectroscopia por fluorescência de energia dispersiva (EDS) de raios-X, em equipamento de fabricante Shimadzu modelo EDX-720. Este espectrômetro possui tubo de ródio (Rh) e detector de silício-lítio (SiLi) resfriado por nitrogênio líquido. A massa específica foi obtida utilizando-se picnômetro a gás hélio de fabricante Micromeritics, modelo AccuPyc 1340. Este equipamento fornece a massa específica e o desvio padrão após cinco determinações. As composições químicas e os valores das massas específicas dos materiais cimentícios são apresentadas na Tabela 3.1.

Tabela 3.1: Composição química (%): CP II F-32, metacaulinita e cinza volante.

Composição Química	CP II F-32	Metacaulinita	Cinza Volante
Al ₂ O ₃	3,78	41,69	28,24
SiO ₂	13,64	51,85	51,58
Fe ₂ O ₃	-	1,91	-
TiO ₂	0,30	1,38	1,3
SO ₃	3,97	1,09	1,51
K ₂ O	0,39	1,89	3,39
ZrO ₂	-	0,03	-
BaO	-	-	-
Cr ₂ O ₃	-	0,01	-
MnO	0,06	-	1,51
ZnO	0,05	-	-
SrO	0,30	-	-
CaO	73,09	-	1,94
CuO	0,02	-	-
Outros	-	0,14	-
Massa específica (g/cm³)	3,17	2,83	2,18
Desvio padrão (g/cm³)	0,0020	0,0033	0,0049

A distribuição granulométrica do cimento, cinza volante e da metacaulinita foi obtida pelo ensaio de granulometria a Laser no equipamento *Malvern MasterSizer* 2000. Este equipamento funciona basicamente pela técnica de espalhamento de luz, na qual os ângulos de difração do raio laser são medidos e relacionados aos diâmetros das partículas. A separação dos aglomerantes de partículas ocorrem utilizando-se dispersante em que o material não seja solúvel, de forma que sejam evitados erros nas medidas de tamanho. Para a metacaulinita e a cinza volante foi utilizada água como dispersante, enquanto para o cimento foi utilizado álcool etílico absoluto. A Figura 3.2 apresenta as curvas granulométricas desses materiais.

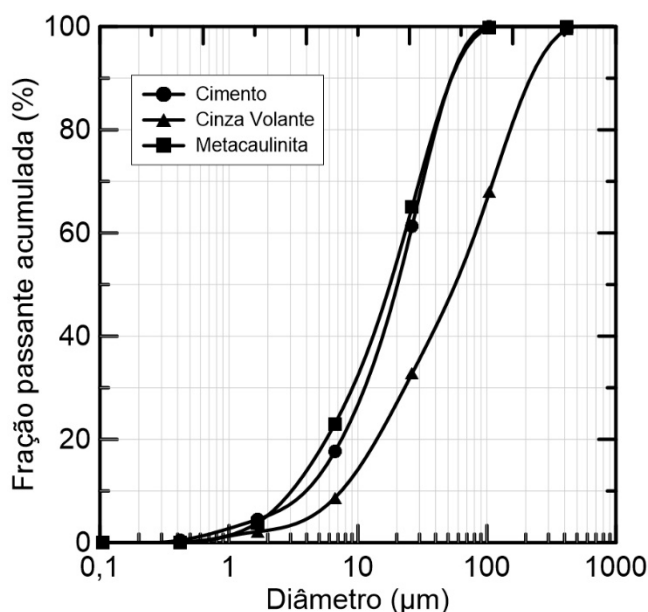


Figura 3.2: Curva granulométrica do CP II F-32, da cinza volante e da metacaulinita.

É possível observar a partir da Figura 3.2 que as curvas granulométricas do cimento, do cinza volante e da metacaulinita são semelhantes, porém a cinza volante apresenta grãos maiores que os demais materiais. Os tamanhos das partículas variam entre 0,35 µm e 400 µm. A Tabela 3.2 apresenta os diâmetros D10, D50 e D90 dos materiais cimentícios, que são definidos como os tamanhos de partícula abaixo dos quais se encontram 10%, 50% e 90% da massa do material, respectivamente.

Tabela 3.2: Diâmetro dos materiais cimentícios (D10, D50 e D90).

Diâmetro	Cimento (µm)	Cinza Volante (µm)	Metacaulinita (µm)
D10	7,2	7,4	3,1
D50	20,3	56,8	17,7
D90	52,7	217,3	53,0

3.2.2 AREIA

Para realização dessa pesquisa foi utilizada areia natural de rio, procedente do município de Maricá/RJ, com massa específica de $2,72 \text{ g/cm}^3$. Foram considerados três grupos com granulometrias diferentes para produção de três diferentes matrizes. A determinação das curvas granulométricas das areias se deu pela norma ABNT NBR NM248, conforme é apresentado na Figura 3.3.

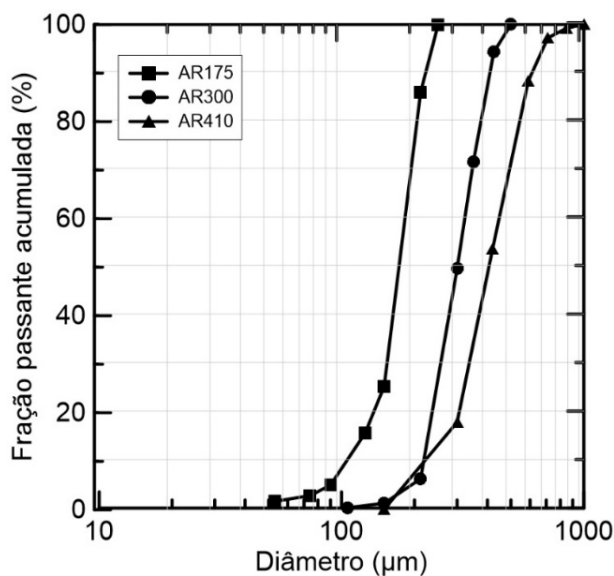


Figura 3.3: Curvas granulométricas das areias utilizadas.

O grupo AR175 corresponde ao passante da areia peneirada na peneira de $212 \mu\text{m}$, com D50 de $175 \mu\text{m}$, ou seja, 50% da massa total da areia AR175 apresenta partículas inferiores a $175 \mu\text{m}$. O grupo AR300 corresponde ao passante da areia peneirada na peneira de $425 \mu\text{m}$, com D50 de $300 \mu\text{m}$, ou seja, 50% da massa total da areia AR300 apresenta partículas inferiores a $300 \mu\text{m}$. Por último, o grupo AR410 corresponde ao passante da areia peneirada na peneira de $840 \mu\text{m}$, com D50 de $410 \mu\text{m}$, ou seja, 50% da massa total da areia AR410 apresenta partículas inferiores a $410 \mu\text{m}$.

A Tabela 3.3 apresenta os diâmetros DMC, D50 e D85 das areias utilizadas, que são definidos como o diâmetro máximo característico, e os tamanhos de partícula abaixo dos quais se encontram 50% e 85% da massa do material, respectivamente.

Tabela 3.3: Diâmetro das areias utilizadas (DMC, D50 e D85).

Diâmetro	AR175	AR300	AR410
DMC	250	425	710
D50	175	300	410
D85	210	390	520

3.2.3 ÁGUA

A água utilizada nesta pesquisa foi proveniente da rede de abastecimento da cidade do Rio de Janeiro.

3.2.4 ADITIVOS QUÍMICOS

Para melhoria da trabalhabilidade das misturas produzidas foi utilizado o superplastificante Glenium 51 de tipo éter policarboxílico, produzido pela empresa BASF. Apresenta teor de sólidos de 28,5-31,5%, pH de 5-7 e densidade em torno de 1,067 – 1,107 g/cm³ (dados fornecidos pelo fabricante).

Com a finalidade de evitar a exsudação, segregação e manter a coesividade das argamassas foi utilizado o agente modificador de viscosidade (VMA) Rheomac UW 410 do fabricante BASF, com densidade de 0,31 g/cm³ (fornecido pelo fabricante). A finalidade da adição do agente é promover coesão entre o reforço e a matriz.

3.2.5 DOSAGEM

A matriz foi escolhida tomando-se como base a matriz utilizada por FERREIRA (2012) com o objetivo de se obter uma matriz livre de hidróxido de cálcio. Em seu estudo, FERREIRA (2012) substituiu parcialmente o cimento CP II F por 27% de metacaulinita e 40% de cinza volante, tendo assim 33% de cimento.

Foram realizadas análises termogravimétricas da pasta cimentícia nas idades de 28, 60 e 90 dias para constatar se havia ou não a presença de hidróxido de cálcio. Tais análises foram realizadas no equipamento modelo SDT Q600 TGA/DTA/DSC Simultâneo da TA Instruments. O equipamento operou com taxa de aquecimento de 10°C/min com temperatura ambiente até aproximadamente 1000°C em atmosfera de nitrogênio e fluxo do registrador de 100 mL/min.

Como pode ser observado na Figura 3.4, os ensaios termogravimétricos indicaram que o hidróxido de cálcio não foi completamente consumido pelas

pozolanas nas temperaturas próximas a 400°C, aos 28, 60 e 90 dias de idade, evento registrado pela presença de picos (eventos térmicos) nessas temperaturas. A pasta apresentou perda de massa de 0,22%, 0,32% e 0,24% nas temperaturas de 422,01°C, 422,01°C e 423,90°C, respectivamente, para as idades de 28, 60 e 90 dias, o que evidencia a presença do hidróxido de cálcio, já que essa perda de massa é caracterizada pela desidroxilação do hidróxido de cálcio em temperaturas de 400°C a 450°C (DWECK *et al.*, 2001). Devido a esse comportamento a matriz foi caracterizada pela presença de aproximadamente 0,3% de hidróxido de cálcio, ou seja, uma matriz cimentícia considerada com baixo teor de hidróxido de cálcio.

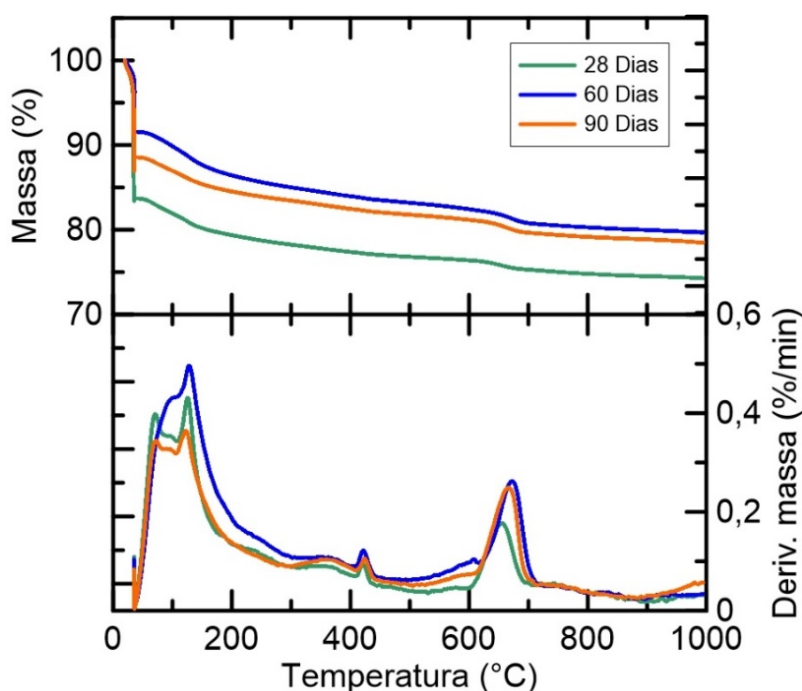


Figura 3.4: Análise termogravimétrica da pasta cimentícia em diferentes idades (28, 60 e 90 dias).

Três diferentes matrizes foram produzidas neste trabalho. A primeira matriz denominada matriz AR175 foi produzida utilizando-se uma areia com D50 de 175 µm. A segunda matriz foi desenvolvida utilizando-se uma areia com D50 de 300 µm, denominada matriz AR300. E por último foi também desenvolvida uma matriz com areia de D50 de 410 µm, denominada matriz AR410. A produção de três diferentes matrizes com diferenças apenas na granulometria do agregado miúdo se deu pela necessidade de se estudar qual a interferência dessa mudança no comportamento mecânico da matriz.

O traço utilizado na dosagem das matrizes foi de 1:0,5:0,4 (materiais cimentícios: areia: água/materiais cimentícios). O superplastificante Glenium 51 (tipo PA) foi utilizado na dosagem para permitir matrizes mais fluidas, trabalháveis e com maior espalhamento (Figura 3.5), o que pôde ser determinado através do ensaio de consistência padrão de acordo com a norma NBR 13276 (ABNT, 2005), como mostra a Tabela 3.4.

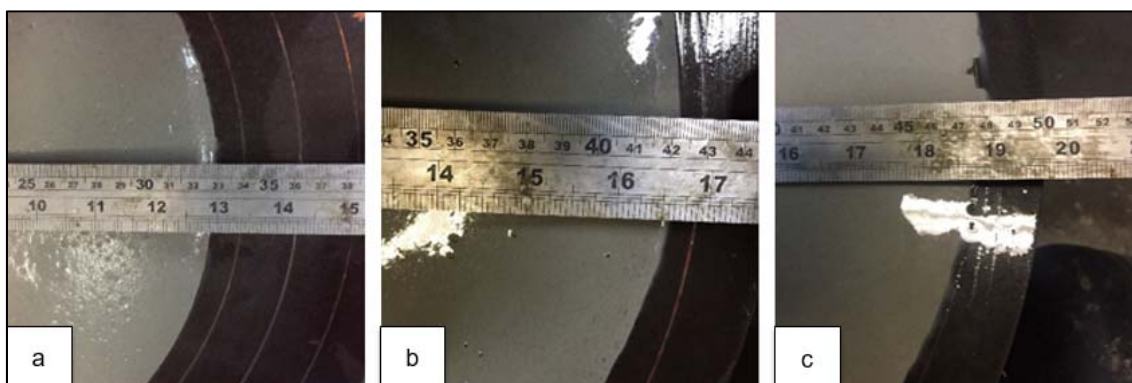


Figura 3.5: Espalhamento das matrizes: (a) AR175, (b) AR300 e (c) AR410.

Tabela 3.4: Valores de espalhamento das matrizes utilizadas.

Espalhamento (mm)	
Matriz AR175	330
Matriz AR300	430
Matriz AR410	480

Para produção de compósitos também foi utilizado o agente modificador de viscosidade (VMA) devido a presença de fibras curtas, para evitar segregação e formação de grumos na mistura. A dosagem por metro cúbico das argamassas é mostrada na Tabela 3.5.

Tabela 3.5: Consumo em kg/m³ de materiais nas matrizes utilizadas.

Consumo (Kg/m ³)						
Cimento	Cinza Volante	Metacaulinita	Areia	Água	SP	VMA (em compósitos)
364,08	436,90	291,26	546,11	419,09	25,99	0,87

3.3 PRODUÇÃO DOS COMPÓSITOS

3.3.1 PROCEDIMENTO DE MOLDAGEM

A preparação dos corpos de prova foi realizada em sala climatizada ($21 \pm 1^\circ\text{C}$) com misturador com capacidade de 20 litros, dotado de 3 velocidades (125, 220 e 450 rpm (Figura 3.6 a).

Nesta pesquisa foi adotado o procedimento de moldagem de OLIVEIRA (2015), que produziu compósitos *SHCC* reforçados com fibras de PVA. Por ser sensível a qualquer alteração no procedimento de mistura e de moldagem, o procedimento de mistura foi rigorosamente seguido, a fim de evitar possíveis discrepâncias nos resultados dos ensaios mecânicos. O tempo total de mistura foi de 8,5 minutos e obedeceu a seguinte sequência de procedimentos:

- Todos os ingredientes sólidos da matriz (cimento, metacaulinita, cinza volante, areia, agente modificador de viscosidade) foram homogeneizados durante 30 segundos na velocidade 1 (125 rpm), após umedecimento da cuba e da pá do misturador (Figura 3.6 b);
- Toda água foi adicionada durante 30 segundos na velocidade 1 (125 rpm) (Figura 3.6 c)
- Foi adicionado 50% da quantidade total de superplastificante durante 60 segundos na velocidade 2 (220 rpm);
- O restante do superplastificante (50%) foi adicionado durante 30 segundos na velocidade 1 (125 rpm);
- Realizou-se a mistura de todos os materiais que haviam sido adicionados até o momento, durante 60 segundos na velocidade 2 (220 rpm) (Figura 3.6 d);
- Parada de 60 segundos no procedimento de mistura para limpeza da cuba e da pá do misturador;
- Para o caso do compósito, as fibras foram adicionadas durante 60 segundos na velocidade 1 (125 rpm) de forma lenta, para evitar a formação de grumos na mistura, o que pode ocasionar uma dispersão não homogênea das fibras na matriz;
- Parada de 60 segundos no procedimento de mistura para limpeza da cuba e da pá do misturador;
- Para uma melhor distribuição das fibras, no caso do compósito, foi realizada a mistura de todos os materiais que já haviam sido adicionados até este momento, durante 120 segundos na velocidade 2 (220 rpm) (Figura 3.6 e);

- Após o procedimento de realização da mistura, o material resultante foi colocado em corpos de prova (Figura 3.6 f);
- Os corpos de provas foram vibrados em uma mesa vibratória durante 30 segundos.



Figura 3.6: Procedimento de moldagem: (a) misturador com capacidade de 20 litros, (b) ingredientes sólidos da matriz misturados, (c) ingredientes sólidos misturados com água, (d) ingredientes misturados após adição do superplastificante, (e) mistura pronta após a adição das fibras de juta, (f) corpos de prova já moldados e prontos para iniciar o processo de cura.

3.3.2 PROCEDIMENTO DE CURA

Após a moldagem, os corpos de prova foram mantidos por 48 horas nos moldes, protegidos da perda de umidade, armazenados em sala com temperatura controlada de 21 ± 1 °C, e protegidos por uma manta. Visto que a desmoldagem dos corpos de prova utilizados no ensaio de fratura apresenta maior grau de dificuldade, para evitar a perda de amostras, esses corpos de prova foram desmoldados após 7 dias.

Após a desmoldagem, os corpos de prova foram levados para a câmara úmida, com umidade relativa de 100% e temperatura de 21 ± 2 °C, onde permaneceram até completarem a idade de 28 dias de cura.

3.4 ENSAIOS MECÂNICOS

Todos os ensaios mecânicos, com exceção ao ensaio de tração das fibras, foram realizados após 28 dias de cura dos corpos de prova. Antes dos ensaios as

superfícies dos corpos de prova foram regularizadas, a fim de se obter superfícies uniformes para aplicação das cargas durante os ensaios.

3.4.1 FIBRAS

3.4.1.1 Tração

As fibras de juta, sem tratamento e tratadas, foram testadas em 3 comprimentos (20, 30 e 40mm), como mostra a Figura 3.7. Elas foram devidamente alinhadas ao molde, com comprimento útil testado, e coladas com o auxílio de cola de secagem rápida nas duas extremidades.

Após a secagem as duas áreas extremas do molde foram recobertas com fita metálica para que a garra pudesse comprimir a fibra sem que esta rompesse. Antes do teste as fibras foram secas durante 24 horas na temperatura de 40°C e transportadas ao laboratório, onde o ensaio foi realizado na temperatura de $22 \pm 1^\circ\text{C}$. O ensaio foi realizado de acordo com a ASTM-C1557 (2008).



Figura 3.7: Moldes utilizados para a realização do ensaio de tração da fibra de juta nos comprimentos de 20, 30 e 40mm.

As amostras foram ensaiadas na máquina de ensaios Tytron 250 (Figura 3.8) sistema MTS, acoplada a um computador para aquisição dos dados força-deslocamento. Foi utilizada célula de carga de 50 N e velocidade de ensaio de 0,1 mm/min.

A sequência de procedimentos para o teste de tração é apresentada na Figura 3.9. Assim que a amostra é presa nas garras da máquina de ensaios, o papel do molde é cortado. Uma das garras se move, sendo que a outra se mantém estacionada, e a força é mensurada pela Tytron 250 até o momento em que a fibra se rompe.

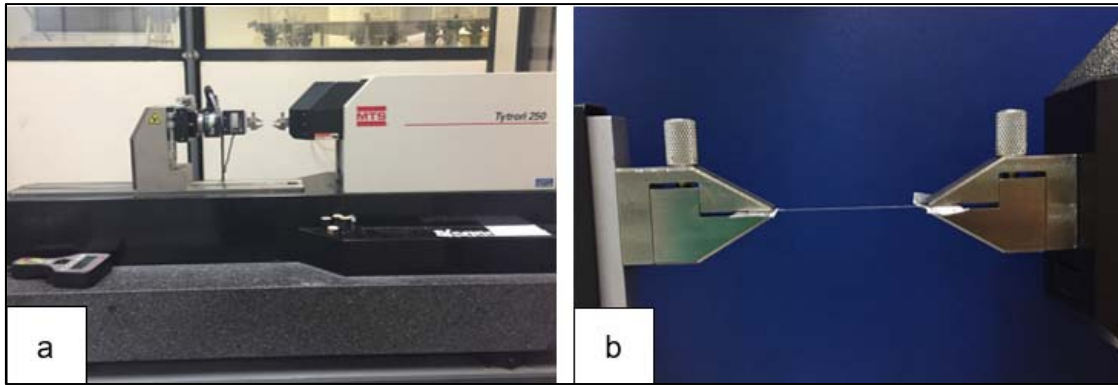


Figura 3.8: (a) Máquina de ensaios Tytron 250 e (b) detalhe do corpo de prova posicionado e fixado pelas garras antes da realização do ensaio.



Figura 3.9: Sequência de procedimentos para o teste de tração das fibras: (a) amostra presa pelas garras ainda com o papel, (b) papel da amostra é cortado nas extremidades, (c) amostra após realização do ensaio ainda fixada nas garras.

Para obtenção da área de cada fibra ensaiada foi utilizado o MEV para visualização da seção transversal dessas fibras. O cálculo dessa medida foi feito com o auxílio do software ImageJ, a partir de um contorno na seção transversal da fibra, como ilustra a Figura 3.10.

A partir dos dados obtidos no ensaio, foram calculadas a tensão de ruptura da fibra e o módulo de elasticidade da mesma, conforme as Equação 3.1 e Equação 3.2.

$$\sigma_{m\acute{a}x} = \frac{P_{m\acute{a}x}}{A} \quad \text{Equação 3.1}$$

$$E = \frac{\sigma_1}{\varepsilon_1} \quad \text{Equação 3.2}$$

Onde $\sigma_{m\acute{a}x}$ é a tensão de ruptura da fibra, $P_{m\acute{a}x}$ é a carga máxima até o momento de ruptura da fibra, A é a área da fibra, σ_1 é a tensão correspondente à 40 % da carga máxima, e ε_1 é a deformação correspondente à tensão σ_1 .

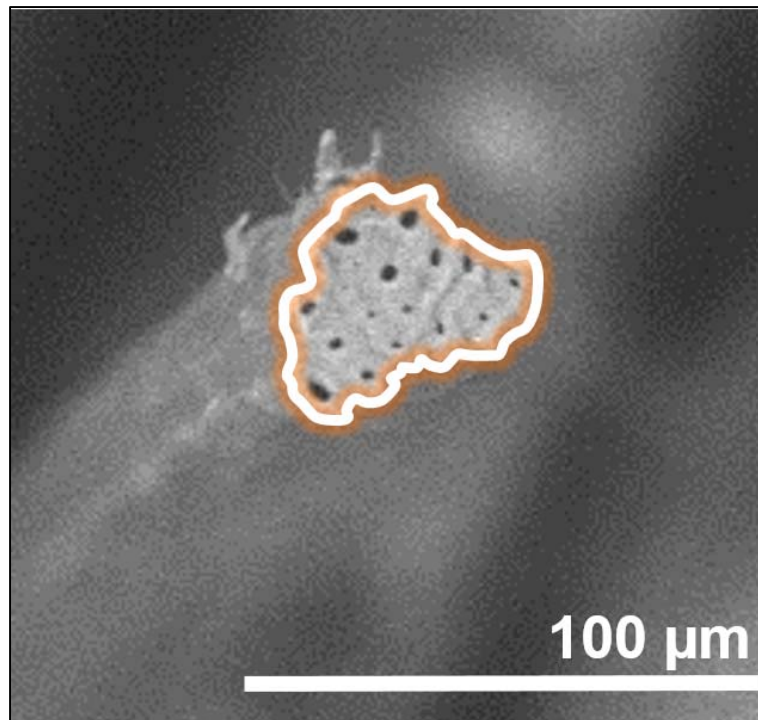


Figura 3.10: Contorno ImageJ para determinação da área das seções transversais das fibras.

3.4.2 MATRIZ CIMENTÍCIA E COMPÓSITO

3.4.2.1 Teste de Fratura

O método de ensaio utilizado para estimativa da tenacidade à fratura das matrizes cimentícias foi baseado na pesquisa de GRABOIS (2016), na qual o autor estudou a propagação da fissura em pastas de cimento com suporte do Método de Elementos Finitos. GRABOIS *et al.* (2017) estimaram a tenacidade da matriz utilizando um corpo de prova denominado *Tapered Double Cantilever Beam (TDCB)*, (Figura 3.11), a fim de se obter uma propagação de fissura estável e ser possível medir a taxa de liberação de energia pelo Método dos Elementos Finitos.

Os corpos de prova de *TDCB* foram testadas na máquina de ensaios modelo Shimadzu AGX, com célula de carga de 5 kN e velocidade de deslocamento de 0,01 mm/min. A configuração do teste se baseou fundamentalmente na montagem do corpo de prova na máquina de ensaios de modo que o *clip gauge* começasse a se movimentar do início do ensaio até o momento em que o corpo de prova atingisse a carga máxima, pela própria capacidade de deformação da matriz. A partir desse instante (quando se atinge a carga máxima), a fissura começa a se propagar pela amostra, sendo que a partir deste momento o *clip* continua a se deslocar até o

momento em que ocorre fratura total da amostra. A Figura 3.12 ilustra as etapas do ensaio de teste de fratura.

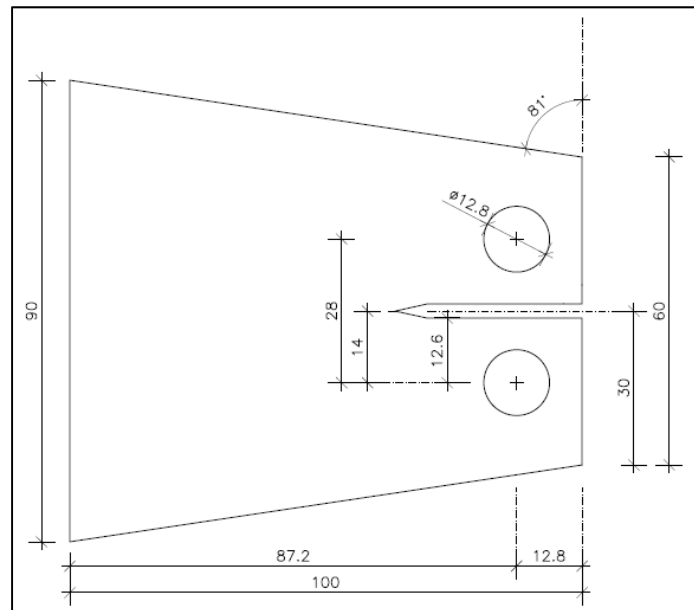


Figura 3.11: Geometria da amostra TDCB (GRABOIS, 2017).

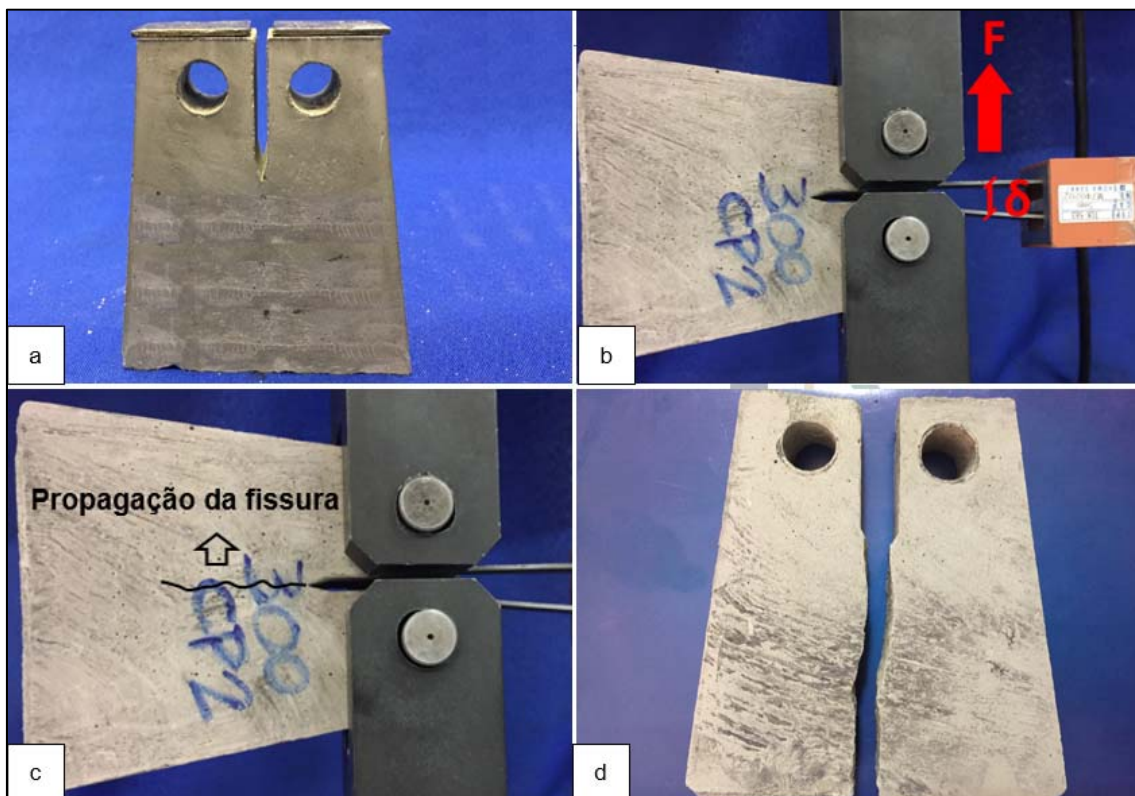


Figura 3.12: Teste de fratura: (a) corpo de prova antes da realização do ensaio, (b) amostra sendo ensaiada, (c) propagação da fissura durante a realização do ensaio, (d) amostra ensaiada.

As curvas de força *versus* abertura do *clip gauge* das amostras de cada matriz foram plotadas e uma delas foi escolhida como representativa do grupo. A energia de fratura foi estimada por meio do cálculo da área abaixo da curva, obtendo-se um parâmetro com unidade de medida em [unidade de força x unidade de comprimento], e este parâmetro foi posteriormente dividido pela área da seção onde ocorre propagação da fissura, obtendo-se a energia de fratura em [unidade de energia / unidade de área]. A Figura 3.13 mostra a curva típica obtida no teste de fratura.

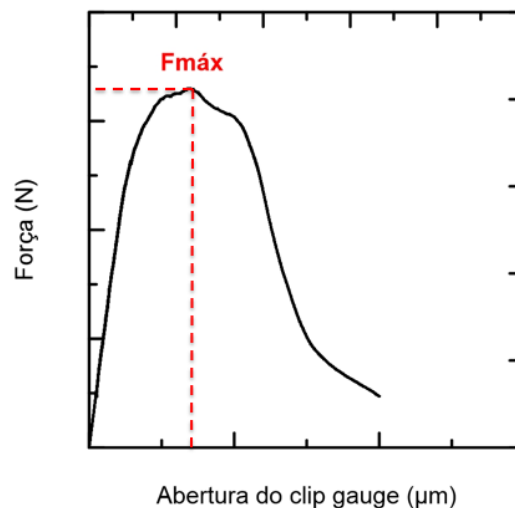


Figura 3.13: Curva típica obtida no teste de fratura.

3.4.2.2 Tração Direta

De acordo com a JAPAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS (2008) a principal característica do *SHCC* é o desempenho à tração, sendo que resistência à tração, capacidade de deformação e abertura máxima da fissura são as mais importantes propriedades dos materiais, definidas para descrever as propriedades do *SHCC*.

Nesse trabalho os ensaios de tração direta das matrizes cimentícias e dos compósitos reforçados com fibras foram realizados na máquina de ensaios modelo Shimadzu AGX, com célula de carga de 100 kN, e velocidade de deslocamento de 0,1 mm/min baseada na literatura (MAGALHÃES, 2010). Foram utilizados corpos de prova com formato de haltere com seção central de 30 x 30mm (largura *versus* espessura), comprimento da seção central de 80mm e comprimento total de 330mm, como ilustra a Figura 3.14. Os deslocamentos axiais foram obtidos a partir da leitura média de dois LVDT's posicionados nas laterais do terço central do corpo de prova.

Para o caso dos compósitos, a fim de se obter uma melhor visualização das fissuras, os corpos de prova foram previamente pintados com tinta branca a base de água na região central e também foi afixada uma escala milimétrica em cada corpo de prova.

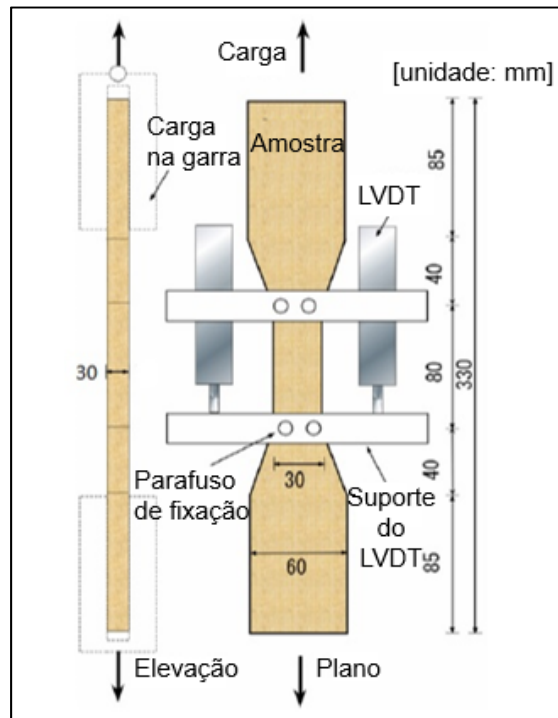


Figura 3.14: Configuração da amostra no ensaio de tração direta (adaptada da JAPAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS, 2008).

Para monitorar o surgimento das fissuras nos corpos de prova, o terço central dos corpos de prova (80mm da parte central) foi fotografado a cada 30 segundos durante os ensaios. As imagens obtidas foram analisadas com o auxílio do software ImageJ, de análise de imagens, para obtenção do tamanho da abertura de fissuras. A Figura 3.15 ilustra o corpo de prova posicionado na máquina de ensaios e o detalhe do terço central.

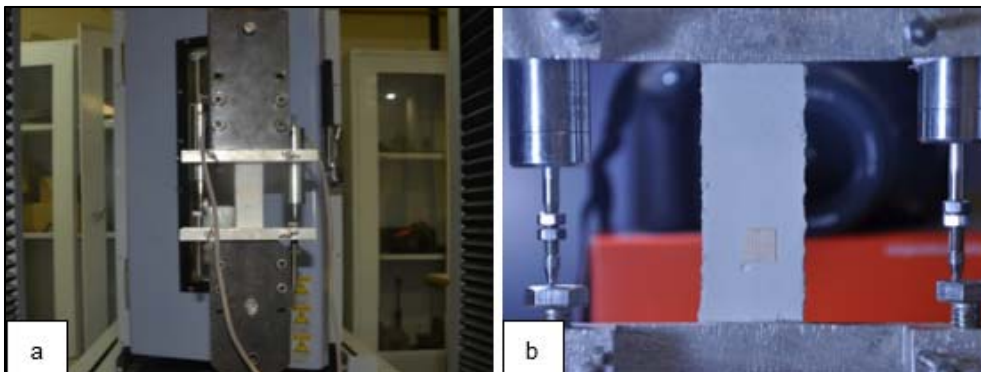


Figura 3.15: Ensaio de tração direta: (a) corpo de prova posicionado na máquina de ensaios, (b) detalhe do terço central do corpo de prova.

Os dados coletados nos ensaios foram utilizados para o desenvolvimento das curvas de tensão *versus* deformação. O valor da resistência de primeira fissura (σ_{fc}) e da máxima resistência pós fissuração (σ_u). foram calculados de acordo com a Equação 3.3:

$$\sigma = \frac{\text{Força de tração}}{\text{Área}} \quad \text{Equação 3.3}$$

O valor da deformação foi calculado pela Equação 3.4:

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L} \quad \text{Equação 3.4}$$

Onde ΔL é o deslocamento axial obtido pela leitura média dos dois LVDT's e L é a medida do terço central da amostra (80mm).

Para a análise do processo de fratura, o procedimento utilizado foi o mesmo utilizado por SILVA *et al.* (2011). Para quantificação do número de fissuras e cálculo da abertura de fissuras, foi utilizada a metodologia proposta por MAGALHÃES (2010). O processo consiste em quantificar as fissuras que se originam em três linhas paralelas marcadas no terço central do corpo de prova (Figura 3.16).

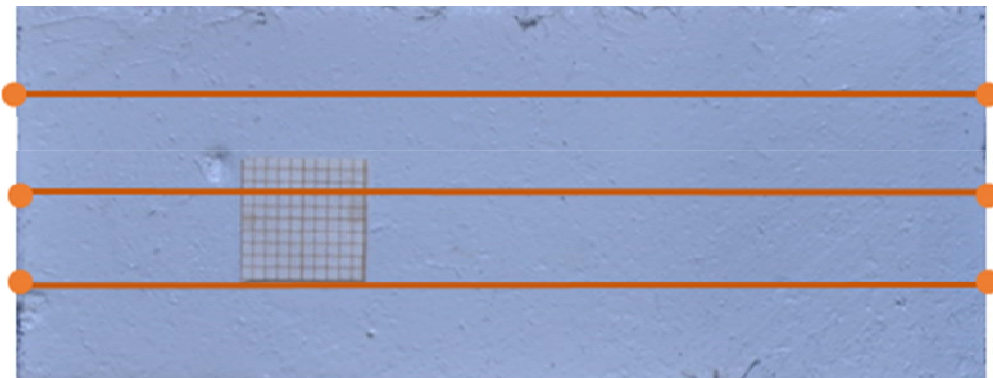


Figura 3.16: Linhas de referência para contagem das fissuras em uma amostra ensaiada na tração direta.

Os valores de aberturas de fissuras foram determinados a partir de 3 leituras em cada fissura, permitindo assim, a obtenção das aberturas médias de cada fissura. E esses valores foram correlacionados em gráficos com os respectivos valores de

tensão e deformação. O ensaio permitiu também, a obtenção da densidade de fissuração na tração, segundo a Equação 3.5.

$$d = \frac{n}{L} \quad \text{Equação 3.5}$$

Onde d é a densidade de fissuração, n é o número de fissuras e L é a região central das amostras.

3.4.2.3 Flexão em quatro pontos

Foram ensaiados à flexão em quatro pontos os compósitos produzidos com a adição de fibras. O ensaio foi realizado na máquina de ensaios de modelo Shimadzu AGX, com célula de carga de 100 kN e velocidade de deslocamento de 0,3 mm/min.

Os dados de deslocamento e carga foram registrados pelo software Trapezium versão 2.22, da Shimadzu, conectado diretamente à máquina de ensaio. Os corpos de prova foram fabricados com geometria retangular de 60,0 x 12,5 x 400,0 mm (largura, espessura e comprimento). Os pontos de aplicação de carga distam entre si 300 mm, e os apoios 100mm. A configuração do ensaio é apresentada na Figura 3.17.

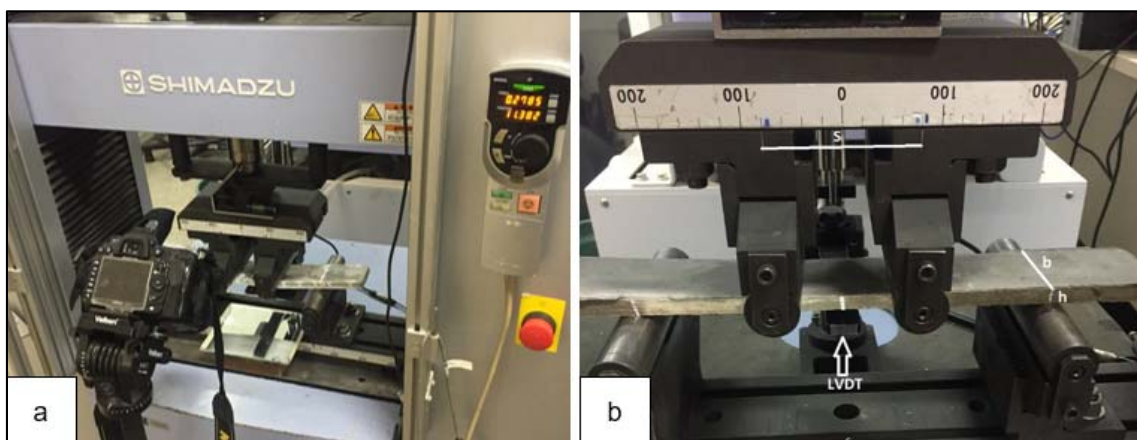


Figura 3.17: Ensaio de flexão em quatro pontos: (a) câmera digital posicionada para o monitoramento do surgimento de fissuras no corpo de prova, (b) detalhe do posicionamento do corpo de prova na máquina de ensaios durante a realização do teste.

O monitoramento das aberturas de fissuras foi realizado da mesma forma que durante o ensaio de tração direta, detalhado na seção anterior, para realização dos cálculos do número de fissuras, assim como também seus respectivos tamanhos e densidade da fissuração na flexão.

Por meio da Equação 3.6, foram calculados os valores de tensão de primeira fissura (σ_{fc}) e os valores de tensão máxima pós fissuração (σ_u). Além de se ter obtidas as deflexões correspondentes à primeira fissura (δ_{fc}) e a máxima fissura (δ_u) por meio do próprio deslocamento do LVDT.

$$\sigma = \frac{6M}{bh^2} \quad \text{Equação 3.6}$$

Onde σ é a tensão na flexão, M é o momento fletor no meio do vão, b é a dimensão na base da amostra, h é a altura da seção transversal da amostra.

3.4.2.4 Compressão

A resistência à compressão e o módulo de elasticidade foram verificados para as 3 matrizes cimentícias desenvolvidas neste trabalho, segundo as prescrições da norma NBR 5739 (2007).

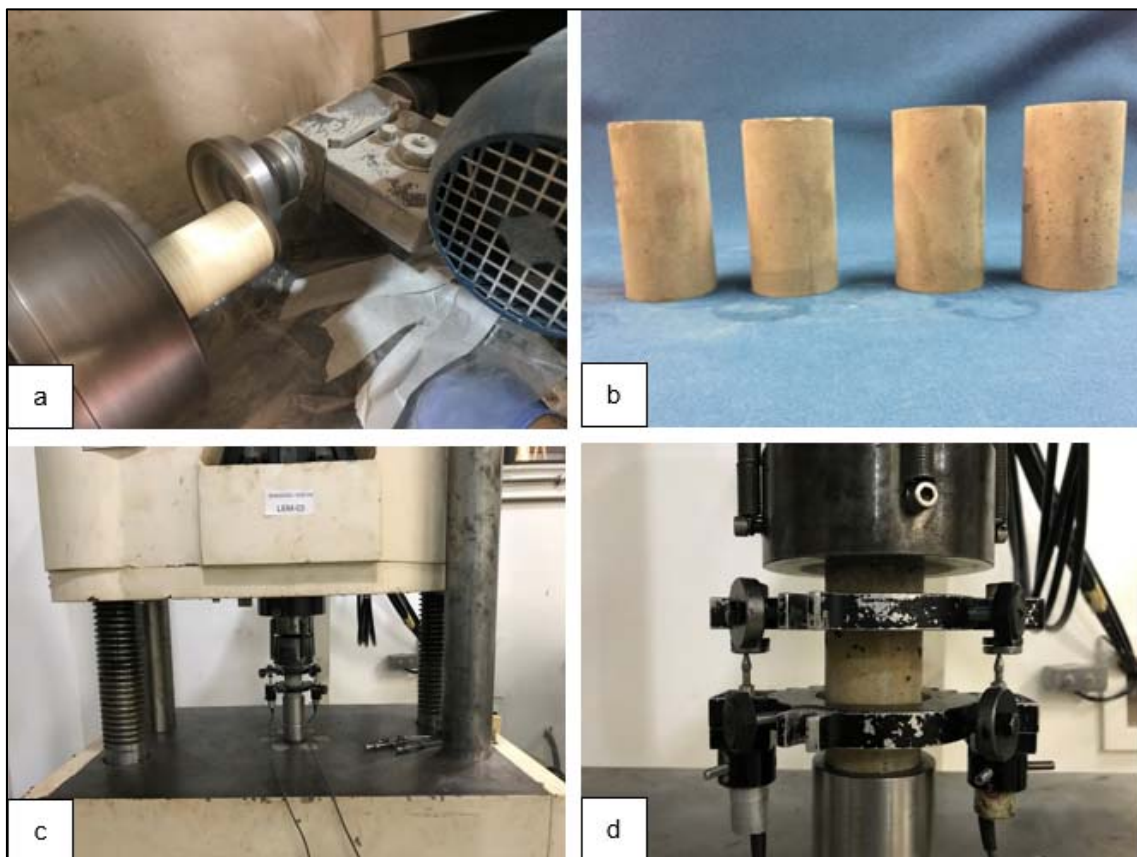


Figura 3.18: Ensaio de compressão axial: (a) faceamento do corpo de prova, (b) corpos de prova faceados e prontos para serem ensaiados, (c) máquina de ensaios Shimadzu UH-F e (d) detalhe do corpo de prova posicionado na máquina de ensaios.

Foram utilizados corpos de prova cilíndricos (50 x 100mm), sendo que estes foram ensaiados após 28 dias de cura na câmara úmida. A regularização das superfícies foi feita com o auxílio de um torno mecânico, como mostra a Figura 3.18a. Os testes foram realizados na máquina de ensaios Shimadzu UH-F, com capacidade máxima de carga de 1000 kN e velocidade de deformação axial de 0,3 mm/min (Figura 3.18c). Os deslocamentos foram medidos por dois LVDT's acoplados por anéis metálicos posicionados na região central do corpo de prova com um curso de 5,0mm (Figura 3.18d).

Os dados de deslocamento axiais e carga foram obtidos por meio de um sistema de aquisição de dados composto de um condicionador ADS 2000, de 16 bits e um software AQDados versão 7.02.08 da empresa Lynx.

A resistência à compressão foi determinada utilizando-se a Equação 3.7 e o módulo de elasticidade foi obtido segundo a NBR 8522 (2008) pela Equação 3.8.

$$\sigma = \frac{P}{A} \quad \text{Equação 3.7}$$

$$E = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\epsilon_2 - \epsilon_1} \quad \text{Equação 3.8}$$

Onde σ é a tensão de compressão, P é a carga aplicada, A é a área da seção transversal do corpo de prova, E é o módulo de elasticidade, σ_2 é a tensão de compressão correspondente à 40 % da carga última, σ_1 é a tensão de compressão correspondente à deformação axial ϵ_1 de 5.10^{-5} , ϵ_2 é a deformação axial produzida pela tensão σ_2 e ϵ_1 é a deformação axial igual a 5.10^{-5} .

3.4.3 INTERFACE FIBRA MATRIZ

3.4.3.1 Ensaio de Arrancamento

A verificação da interface fibra-matriz foi realizada por meio do ensaio de arrancamento (*pullout test*). O ensaio foi realizado para as fibras sem tratamento e tratadas em solução alcalina, no comprimento de embebição de 7mm, com as 3 diferentes matrizes do trabalho. O comprimento de 7mm se justifica pelo fato de os comprimentos de 10, 15 e 20mm terem sido ensaiados e apresentado ruptura de fibras mesmo antes de acontecer o arrancamento da mesma. Para garantir um adequado revestimento da fibra na matriz, foram utilizados moldes de PVC. Os moldes de PVC são tubos com 25mm de diâmetro e 7mm de profundidade.

Inicialmente 4 pontos foram marcados na base do molde de PVC para definir 2 diâmetros. Em seguida, uma fita de papel foi colada na parte inferior do molde e utilizando um lápis e uma régua, os 2 diâmetros foram claramente interceptados para definir o centro. O mesmo procedimento foi realizado na parte superior do molde. Depois disso, com o auxílio de uma agulha, a fibra foi transpassada no centro do molde através dos pontos interceptados marcados na fita de papel colada na parte inferior e superior do molde. Uma vez que a fibra foi posicionada, a matriz foi depositada dentro do molde com o auxílio de uma seringa, e com a fita de papel a amostra foi vedada, garantindo assim a posição reta e central da fibra ao longo do corpo de prova. A Figura 3.19 ilustra a sequência de preparação da amostra utilizada no ensaio.

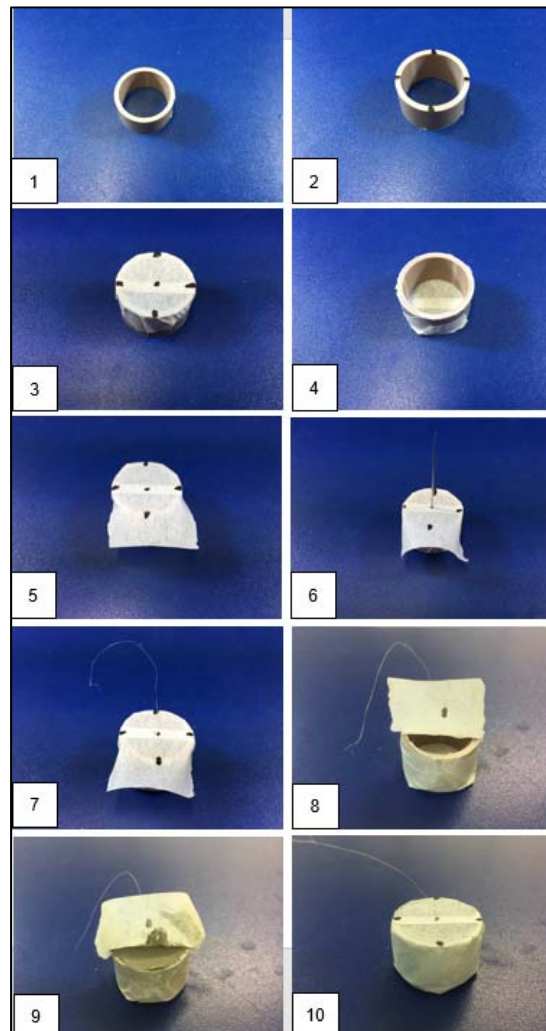


Figura 3.19: Sequência de preparação da amostra utilizada no ensaio de arrancamento.

Após 27 dias de cura dentro da câmara úmida, com umidade de 100% e temperatura controlada de $21 \pm 1^\circ\text{C}$, seguido de 1 dia de secagem em temperatura de

23 ± 1°C, os corpos de prova foram submetidos ao ensaio de arrancamento, para verificar o comportamento da interface fibra-matriz.

A máquina de ensaios utilizada foi a mesma utilizada para realização dos ensaios de tração das fibras, Tytron 250, com célula de carga de 50 N e velocidade de ensaio de 0,4 mm/min. O tubo de PVC é posicionado dentro cilindro de ferro e apertado com parafusos para evitar o movimento da amostra durante o teste (Figura 3.20a). A fibra é arrancada da amostra (Figura 3.20b) e os dados de força e deslocamento são coletados.

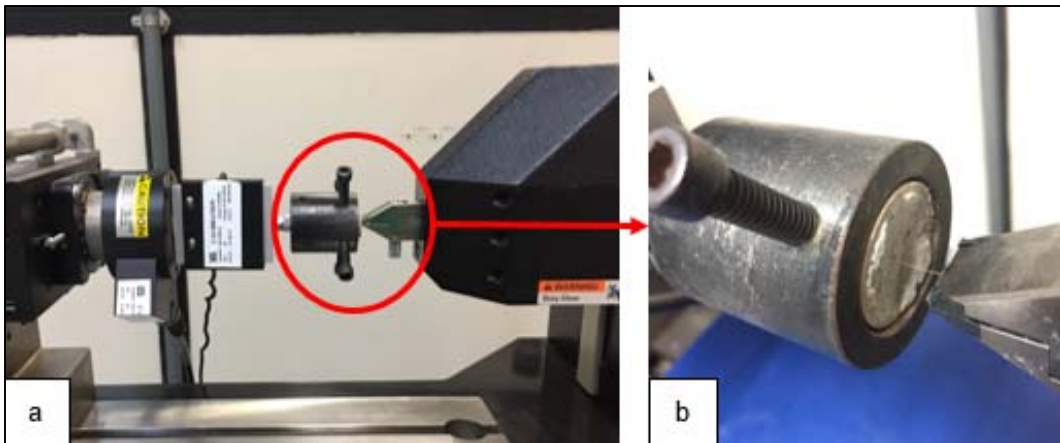


Figura 3.20: Ensaio de arrancamento da fibra: (a) corpo de prova posicionado na máquina de ensaios Tytron 250, (b) detalhe da fibra sendo arrancada do corpo de prova ensaiado.

Os dados coletados no ensaio foram analisados de acordo com o modelo de LIN *et. al* (1999) adaptado para fibras vegetais, utilizando a área e o perímetro da superfície obtidos no software ImageJ. Sendo assim, os valores da energia química de ligação (G_d), e da tensão máxima de ligação ($\tau_{m\acute{a}x}$), foram calculados pelas Equação 3.9 e Equação 3.10.

$$G_d = \frac{(P_a - P_b)^2}{2E_f A_f \text{Perímetro}} \quad \text{Equação 3.9}$$

$$\tau_{m\acute{a}x} = \frac{P_{m\acute{a}x}}{l_f \text{Perímetro}} \quad \text{Equação 3.10}$$

Onde P_a é carga adesional, ou seja, a carga necessária para se iniciar o processo de arrancamento da fibra da matriz, P_b é a carga ficcional após a queda repentina de P_a , E_f é o módulo de elasticidade da fibra, A_f é a área da fibra medida no ImageJ, $P_{m\acute{a}x}$ é

a carga máxima durante o arrancamento e l_f é o comprimento de embebiamento da fibra.

3.5 MODELO MICROMECAÂNICO

Os dados obtidos a partir dos ensaios mecânicos da fibra, das matrizes cimentícias e das interfaces fibra matrizes foram implementados no modelo teórico de dosagem para previsão do volume crítico de fibras necessário na moldagem dos compósitos.

O modelo aplicado neste trabalho foi desenvolvido pela Universidade de Michigan por LEUNG e LI (1991) e foi projetado para fibras sintéticas descontínuas orientadas aleatoriamente em compósitos de matriz quebradiça. A finalidade do modelo é, a partir das propriedades das fibras, da matriz e da interface fibra matriz, determinar a dosagem ideal de fibras necessária para obter máxima ductilidade de tração do compósito (YANG E LI, 2006).

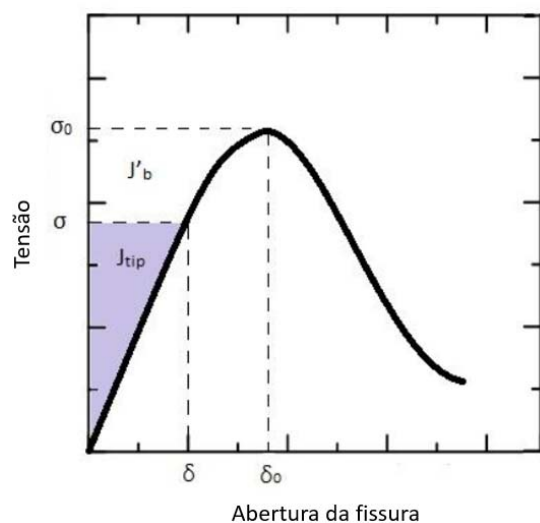


Figura 3.21: Curva representativa da abertura de fissura com energia complementar (J'_b) e máxima tensão de ligação entre fibra-matriz (σ_0) para a correspondente abertura máxima de fissura (δ_0) (adaptada de ZUKOWSKI, 2017).

O comportamento de pseudo-endurecimento em compósitos surge simultaneamente com o aparecimento de múltiplas fissuras, situação caracterizada pela divisão da matriz em seguimentos conectados por fibras. Para que ocorra o comportamento de múltipla fissuração é necessário que ocorra a formação estável de fissuras planas sob tensão, e para que isso seja possível é requerido que a tenacidade da matriz (J_{tip}), ou seja, a energia necessária para que se inicie o processo de

abertura de fissuras, seja menor que a energia complementar (J'_b). Esses dois valores de energia são calculados a partir da curva de tensão (σ) versus abertura de fissura (δ) (MARSHALL E COX, 1988), como ilustra a Figura 3.21.

A Equação 3.11 apresenta o conceito de balanço energético durante a formação da fissura, o que envolve energia externa (trabalho), G_c , com energia absorvida para a formação da fissura (tenacidade da matriz), J_{tip} , e absorção de energia durante o processo de arrancamento da fibra da matriz (aderência fibra-matriz), J'_b . Este critério determina o tipo de propagação da fissura (estável ou instável), conforme ilustrado na Figura 3.22. A abertura da fissura (δ) deve ser menor que a abertura máxima de fissura que as fibras podem suportar (δ_0), para manter o nível de tensão abaixo da capacidade de aderência das fibras, caso contrário pode ocorrer o aumento do tamanho da primeira fissura sem a formação de novas aberturas (YANG E LI, 2006).

$$G_c \equiv J_{tip} \leq \sigma_0 \delta_0 - \int_0^{\delta_0} \sigma(\delta) d\delta \equiv J'_b \quad \text{Equação 3.11}$$

Onde σ_0 é a tensão máxima de ligação entre a fibra e a matriz, correspondente à máxima abertura de fissura que a fibra pode suportar (δ_0), G_c é a taxa de liberação de energia, J_{tip} é a energia de fratura da matriz (tenacidade), obtida por meio do ensaio de fratura da matriz, e J'_b é a energia complementar.

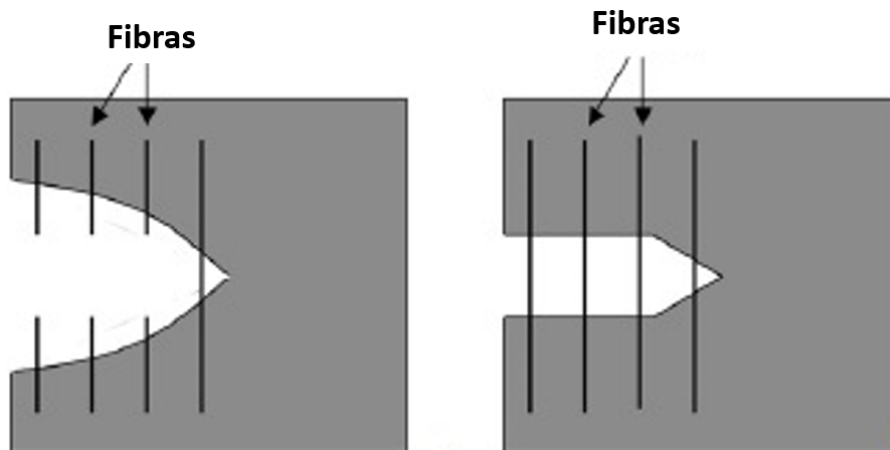


Figura 3.22: Tipos de propagação de fissura: instável (esquerda) e estável (direita) (SIERRA BELTRÁN, 2011).

A curva de tensão *versus* abertura da fissura $\sigma(\delta)$ é derivada da combinação de ferramentas analíticas da mecânica da fratura e da micromecânica (LIN, KANDA, E LI 1999). O primeiro critério a ser obedecido é o critério de energia, que leva em

consideração a energia de ligação entre a fibra e a matriz (G_d), e a tensão friccional (τ), dados obtidos no ensaio de arrancamento da fibra da matriz. O cálculo da energia complementar foi obtido pela Equação 3.12:

$$J'_b = \frac{V_f \tau^2 L_f}{6d_f^2 E_f} - \frac{2V_f G_d L_f}{d_f} + \frac{8V_f G_d}{3\tau} \sqrt{\frac{2E_f G_d}{d_f} - \frac{2V_f E_f G_d^2}{\tau^2 L_f}} \quad \text{Equação 3.12}$$

A Equação 3.12 pode ser simplificada para:

$$J'_b = V_f \frac{L_f}{d_f} \left(\frac{\tau^2 E_f^2}{6d_f E_f} - 2G_d \right) \quad \text{Equação 3.13}$$

Onde V_f é o volume estimado de fibras inserido inicialmente no modelo, L_f é o comprimento da fibra, d_f é o diâmetro circular correspondente a área da fibra, e E_f é o módulo de elasticidade da fibra, obtido no ensaio de tração direta da fibra.

O segundo critério que deve ser obedecido é o critério de resistência e está relacionado à tensão de primeira fissura (σ_{fc}), que deve ser menor que a tensão máxima de ligação entre a fibra e a matriz (σ_0) para que o início da formação de fissuras seja controlado.

$$\sigma_{fc} < \sigma_0 \quad \text{Equação 3.14}$$

Após o cálculo de δ_0 ter sido realizado pela Equação 3.15, a tensão máxima de ligação entre fibra e matriz correspondente ao δ_0 foi realizada pela Equação 3.16.

$$\delta_0 = \frac{\tau L_f^2}{d_f E_f} - \frac{2G_d}{\tau} \quad \text{Equação 3.15}$$

$$\sigma(\delta) = \begin{cases} 2V_f \sqrt{(2G_d + \tau\sigma) \frac{E_f}{d_f} - \frac{V_f E_f \delta}{L_f}} & \delta \leq \delta_c \\ \frac{4V_f \tau}{L_f d_f} \left(\frac{L_f}{2} - \delta \right) & \delta_c \leq \delta \leq \frac{L_f}{2} \end{cases} \quad \text{Equação 3.16}$$

O comportamento de endurecimento na tração direta (*strain-hardening*) é obtido se satisfeitos os critérios de energia e resistência. Se esses critérios não forem obedecidos ocorre redução e suavização do valor da tensão, também conhecido como

amolecimento (*strain-softening*) (LIN, KANDA, e LI, 1999) (V.C. LI e LEUNG, 1992). Devido às imperfeições que podem ocorrer no compósito, como por exemplo a má distribuição das fibras em algumas regiões do corpo de prova, o comportamento do mesmo pode ser influenciado. Em consequência, é recomendada uma grande margem entre os valores dos critérios tanto de energia quanto de resistência, o que pode ser representado pelo índice de desempenho de pseudo-endurecimento de tensão (*PSH*) (KANDA, 1998), conforme as Equação 3.17 e Equação 3.18.

$$PSH_{energia} = \frac{J'_b}{J_{tip}} \quad \text{Equação 3.17}$$

$$PSH_{resistência} = \frac{\sigma_0}{\sigma_{fc}} \quad \text{Equação 3.18}$$

Quanto maiores os valores de *PSH*, maior a chance de ocorrer múltiplas fissuras, o que leva à maior capacidade de deformação. YANG E LI (2006) recomendam valores no intervalo de 2-3 para *PSH_{resistência}* e acima de 5 para *PSH_{energia}*.

4 RESULTADOS

4.1 INFLUÊNCIA DOS TRATAMENTOS SUPERFICIAIS NAS FIBRAS

4.1.1 ANÁLISE MICROESTRUTURAL

A Figura 4.1 mostra imagens obtidas das seções transversais da fibra de juta onde é possível observar que a morfologia da fibra apresenta grande variabilidade quanto à espessura das paredes celulares, número e diâmetro dos lúmens, assim como também reportaram FIDELIS (2014) e FERREIRA (2016).

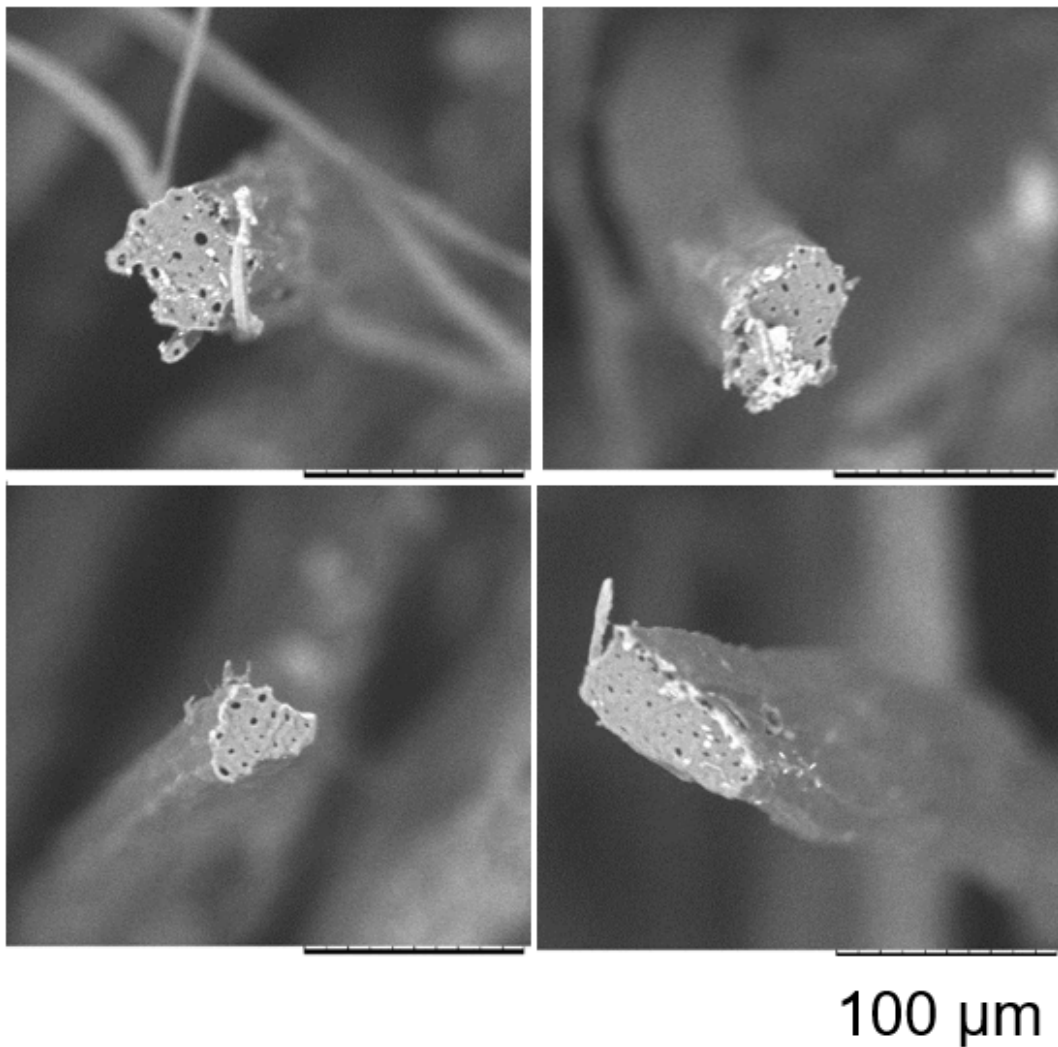


Figura 4.1: Diferentes morfologias das fibras de juta sem tratamento (imagens obtidas no MEV).

A Figura 4.2 ilustra o aspecto das superfícies não tratada, hornificada em água e tratada em solução alcalina. É possível observar que a fibra hornificada parece perder substâncias graxas e pequenos extrativos presentes na fibra original. Uma maior diferença ocorre quando a fibra é submetida ao tratamento alcalino. Pela literatura é possível inferir que material depositado na superfície da fibra tratada em meio alcalino são cristais de hidróxido de cálcio de diferentes dimensões, resultado da grande afinidade com o hidróxido de cálcio que essa fibra possui (FERREIRA, 2016).

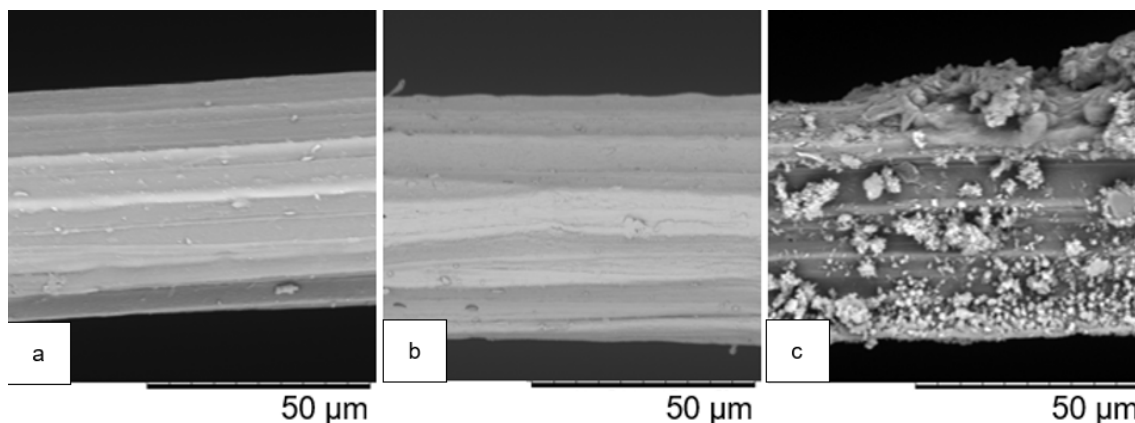


Figura 4.2: Superfície da fibra de juta: (a) sem tratamento, (b) hornificada em água, e (c) tratada em solução alcalina (imagens obtidas no MEV).

4.1.2 ANÁLISE TERMOGRAVIMÉTRICA (TGA) DA FIBRA DE JUTA ANTES E APÓS O TRATAMENTO ALCALINO

Esta análise foi realizada para o grupo de fibras não tratada e para o grupo de fibras submetidas ao tratamento alcalino. Para realização da análise as fibras foram cortadas com tamanhos de aproximadamente 1mm. A Figura 4.3 apresenta os resultados da análise termogravimétrica (TGA) realizada nas fibras não tratadas e nas fibras tratadas em solução alcalina. O perfil de degradação térmica apresentado é típico para fibras lignocelulósicas com três estágios de perda de massa. A partir dos resultados é possível observar que a primeira perda de massa, correspondente a evaporação da água, ocorreu em torno de 100°C, apresentando valores de 9% para fibras sem tratamento e 12% para fibras alcalinas. A segunda perda de massa, relativa à decomposição da hemicelulose (ARBELAIZ *et al.*, 2006) ocorreu em torno de 250 a 350°C. A última perda de massa, associada à degradação da celulose, ocorreu nas temperaturas entre 350 e 400°C, sendo essa a maior perda observada nas fibras de juta, com valores de 74% para a fibra sem tratamento e de 52% para as fibras tratadas em solução alcalina. Devido ao fato de a lignina estar espalhada entre as cadeias de

celulose (WEI E MEYER, 2015) sua degradação continua entre 200 e 600°C, porém sem evento de degradação evidente. O mesmo comportamento foi também obtido por FERREIRA (2016) para fibras de juta tratadas em meio alcalino.

De acordo com o que foi reportado por FERREIRA (2016), os resultados desse trabalho também mostram que o tratamento alcalino reduziu a quantidade de hemicelulose presentes na fibra, assim como houve redução do pico correspondente à degradação da celulose. Por outro lado, o tratamento alcalino promoveu um pico térmico entre as temperaturas de 600 e 700°C, correspondente à decomposição do carbonato de cálcio (CaCO_3), com perda de 5% em massa, presente devido à maior afinidade das fibras alcalinas com esse composto.

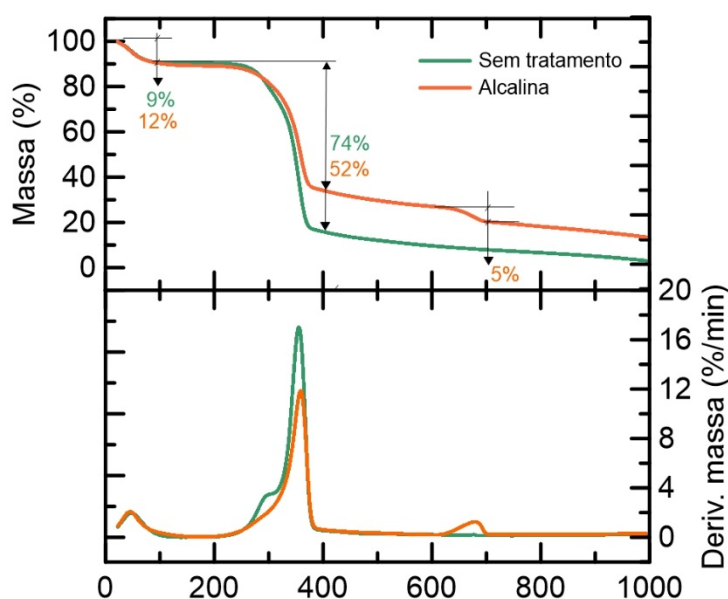


Figura 4.3: Análise térmica das fibras de juta antes e depois do tratamento alcalino.

4.1.3 TRAÇÃO

As Tabela 4.1, Tabela 4.2 e Tabela 4.3 apresentam os resultados dos ensaios de tração das fibras de juta para diferentes comprimentos (20, 30 e 40mm) de três grupos de fibras (sem tratamento, hornificadas em água e tratadas em solução alcalina). A partir dos resultados é possível observar que o módulo de elasticidade da fibra (E_f), calculado na porção elástica da curva tensão-deformação, não foi influenciado pela mudança do comprimento de fibra, sendo que as variações observadas nos valores do módulo, dentro do mesmo grupo, são relativas à microestrutura das fibras e possíveis danos causados no processo de extração, como reportado por Fidelis *et al.* (2013). No entanto, nos resultados das fibras submetidas à

hornificação em água e as fibras tratadas em solução alcalina, há minoração da tensão máxima atingida de acordo com a majoração dos comprimentos. Na maioria dos grupos testados, a máxima tensão atingida ocorreu para os menores comprimentos de fibras. Isso se justifica pelo fato de o aumento do comprimento de fibra aumentar a probabilidade de danos causados à fibra (ZUKOWSKI, 2017).

Para o grupo de fibras não tratadas, a resistência máxima à tração variou de 234 a 307 MPa, com desvio padrão de aproximadamente 111 a 73 MPa, como mostra a Tabela 4.1. As representações gráficas dos resultados médios calculados para fibras de juta sem tratamento são apresentadas pela Figura 4.4.

Tabela 4.1: Resultados médios e desvio padrão dos diferentes comprimentos de fibras de juta sem tratamento.

L_f (mm)	Área (μm^2)	Perímetro (μm)	Deformação (mm/mm)	Força de ruptura (N)	Tensão máxima (MPa)	E_f (GPa)
20	3660 (570)	254,19 (30,83)	0,01 (0,004)	0,89 (0,35)	244,34 (95,20)	22,17 (7,89)
30	2910 (1710)	205,74 (60,52)	0,01 (0,002)	0,89 (0,21)	307,103 (72,67)	26,97 (5,93)
40	4230 (1480)	302,36 (66,29)	0,01 (0,002)	0,99 (0,47)	234,31 (111,12)	22,10 (8,78)

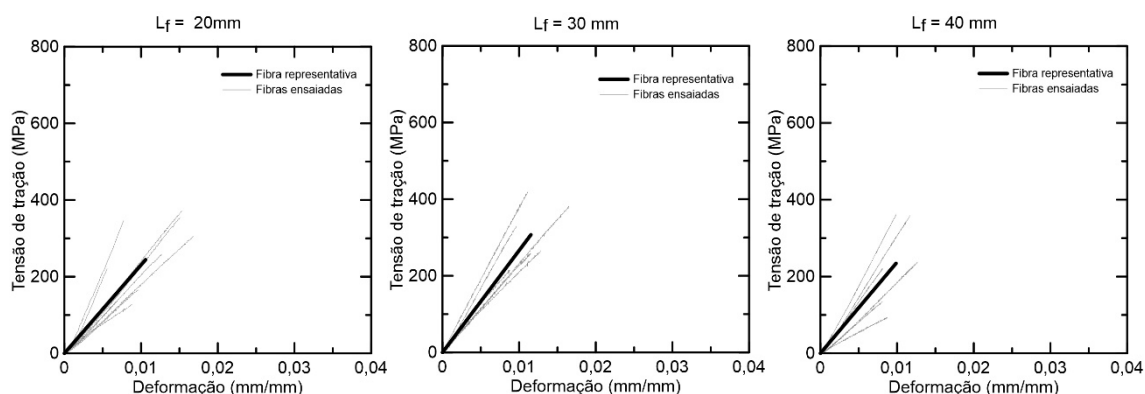


Figura 4.4: Curvas tensão-deformação para diferentes comprimentos de fibras de juta sem tratamento.

As fibras submetidas à hornificação em água apresentaram maior capacidade de resistência à tração em relação às fibras não tratadas, variando a tensão máxima de 276 a 535 MPa com desvio padrão oscilando entre 102 a 151 MPa, como mostra a Tabela 4.2. A representação gráfica dos resultados obtidos nos testes de tração das fibras submetidas à hornificação em água são ilustrados na Figura 4.5.

Tabela 4.2: Resultados médios e desvio padrão dos diferentes comprimentos de fibras de juta hornificadas em água.

L_f (mm)	Área (μm^2)	Perímetro (μm)	Deformação (mm/mm)	Força de ruptura (N)	Tensão máxima (MPa)	E_f (GPa)
20	1840 (1300)	176,99 (65,31)	0,01 (0,003)	0,99 (0,28)	535,88 (151,01)	45,29 (7,71)
30	2990 (860)	247,32 (39,62)	0,01 (0,004)	0,83 (0,30)	276,41 (102,02)	35,16 (9,84)
40	2370 (560)	212,68 (55,95)	0,01 (0,002)	0,68 (0,18)	285,79 (74,74)	29,20 (5,57)

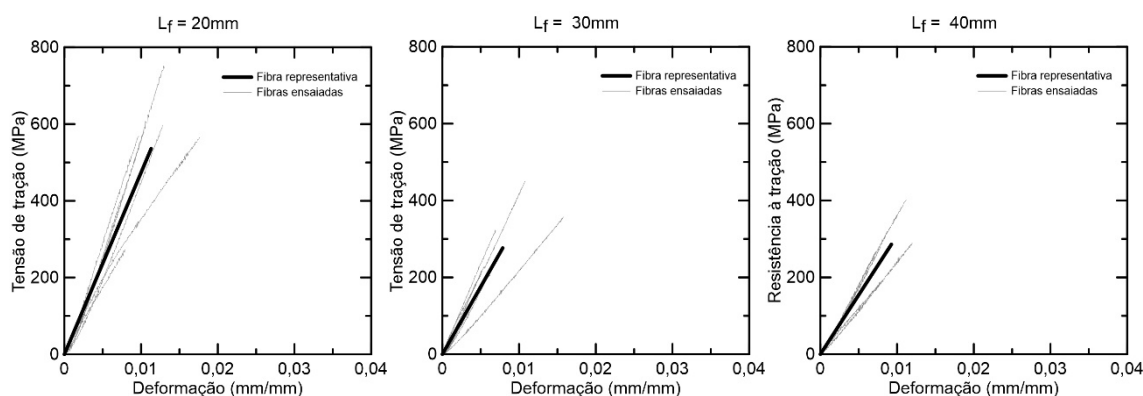


Figura 4.5: Curvas tensão-deformação para diferentes comprimentos de fibras de juta hornificadas em água.

As fibras tratadas em solução alcalina apresentaram a maior resistência à tração em relação aos outros dois grupos de fibras testados, com tensão máxima variando de 475 a 690 MPa e desvio padrão entre 174 e 74 MPa, como pode ser visto na Tabela 4.3. A Figura 4.6 representa as curvas tensão-deformação obtida nos ensaios de tração realizados nas fibras alcalinas.

As fibras de juta sem tratamento apresentaram tensões máximas menores que 307 MPa com módulo de elasticidade maiores que 22 GPa. A hornificação em água aumentou o valor de tensão máxima para mais de 276 MPa sendo os módulos de elasticidade maiores que 29 GPa. Para as fibras tratadas em meio alcalino, também foi observada melhoria nas propriedades mecânicas à tração, já que a tensão máxima registrou valores maiores que 475 MPa e o módulo de elasticidade valores maiores que 35 GPa.

Tabela 4.3: Resultados médios e desvio padrão dos diferentes comprimentos de fibras de juta alcalinas.

L_f (mm)	Área (mm ²)	Perímetro (μ m)	Deformação (mm/mm)	Força de ruptura (N)	Tensão máxima (MPa)	E_f (GPa)
20	1990 (500)	182,68 (25,76)	0,02 (0,008)	1,37 (0,15)	689,77 (74,80)	35,94 (10,83)
30	2420 (461)	198,46 (51,79)	0,01 (0,003)	1,16 (0,28)	480,80 (116,30)	38,27 (6,77)
40	2020 (690)	194,81 (20,51)	0,01 (0,003)	0,96 (0,35)	475,30 (174,37)	42,22 (9,27)

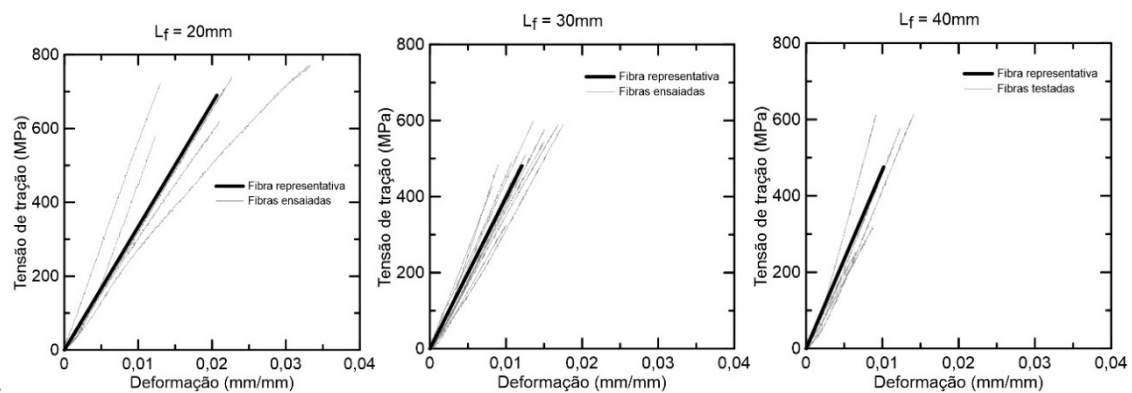


Figura 4.6: Curvas tensão-deformação para diferentes comprimentos de fibras de juta alcalinas.

A majoração da resistência à tração está correlacionada com as variações dimensionais sofridas pelas fibras após serem submetidas aos tratamentos. Tanto a hornificação em água quanto o tratamento em solução alcalina reduziram as áreas das fibras. Essa redução dimensional pode estar associada à remoção da cera e das impurezas das fibras no processo de lavagem, assim como a redução de hemicelulose e da lignina (ZUKOWSKI, 2017).

As amostras com menores comprimentos de fibras (20 e 30mm), apresentaram os melhores resultados. Enquanto as fibras de 20mm alcalinas apresentaram 2,06% e 1,37 N de deformação e força de ruptura, respectivamente, os grupos de fibras não tratadas e hornificadas em água apresentaram 1,06% e 0,89 N, e 1,13% e 0,99 N respectivamente, para o mesmo comprimento de fibra. A segunda maior força de ruptura no grupo alcalino foi registrada pelas fibras de 30mm, com 1,16N.

Os resultados dos ensaios de tração nas fibras mostraram que o comprimento de fibra influencia na resistência à tração da mesma. Os tratamentos de hornificação

em água e em solução alcalina reduziram as áreas das fibras e se apresentaram como solução para melhoria das propriedades mecânicas das mesmas, sendo que o tratamento alcalino apresentou melhores resultados.

4.2 INFLUÊNCIA DO TAMANHO DA AREIA NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DA MATRIZ CIMENTÍCIA

A influência do tamanho da partícula de areia nas propriedades mecânicas da matriz cimentícia foi avaliada por meio do teste de fratura, utilizado para determinar a energia necessária para início do processo de fratura; do ensaio de tração, utilizado para determinação da tensão de primeira fissura da matriz; e do ensaio de compressão, utilizado para determinação do módulo de elasticidade da matriz.

4.2.1 TESTE DE FRATURA

Os resultados experimentais médios da força crítica necessária para que se inicie o processo de fissura e da energia de fratura ou tenacidade (J_{tip}) das matrizes AR175, AR300 e AR410 são apresentados na Tabela 4.4 .

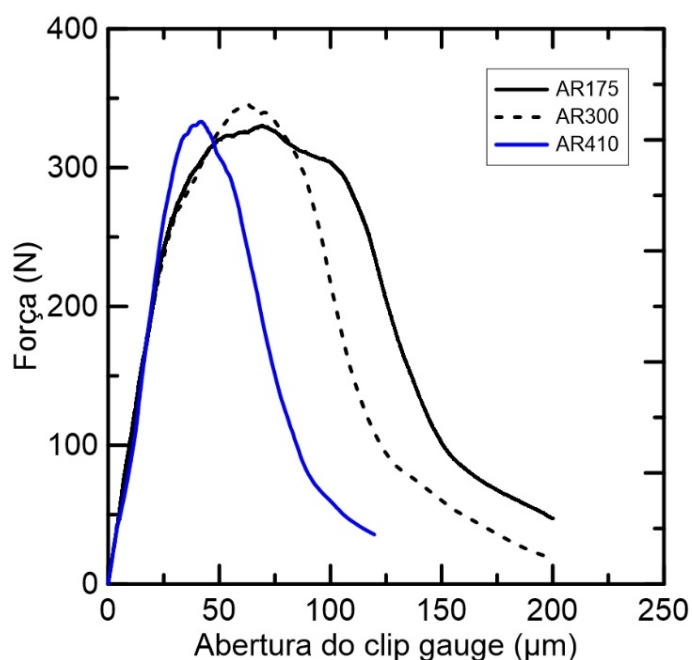


Figura 4.7: Curvas representativas de força *versus* abertura do clip gauge das matrizes AR175, AR300 e AR410.

Tabela 4.4: Valores médios de força crítica e de tenacidade das matrizes AR175, AR300 e AR410.

Teste de fratura	Força crítica	Energia de fratura ($G_c = J_{tip}$)
	N	J/m ²
Matriz AR175	330,01 (-)	26,58 (-)
Matriz AR300	345,84 (16,18)	22,12 (3,57)
Matriz AR410	333,02 (17,02)	16,63 (2,80)

*Valor entre parênteses: desvio padrão.

Os resultados mostraram que a matriz com areia de menor diâmetro máximo, matriz AR175, apresentou maior energia de fratura (energia de propagação de fissura) quando comparada às matrizes com areias de diâmetros maiores, matriz AR300 e matriz AR410, o que não é favorável para formação de múltiplas fissuras. Para geração de mecanismos de falha com múltiplas fissuras é necessário que a energia de fratura da matriz seja menor que a energia do sistema fibra-matriz (J'_b). Assim sendo, a modificação das propriedades da matriz (redução da resistência da matriz) com a redução da energia de fratura pode ser favorável ao desenvolvimento de compósitos reforçados com fibra vegetais que apresentem comportamento de endurecimento na tração direta. Portanto, os dados de energia de fratura de cada matriz foram utilizados na construção de modelos micromecânicos de dosagem para cada matriz correspondente apresentada, a fim de se obter os volumes críticos de fibras necessários para desenvolvimento dos compósitos.

4.2.2 TRAÇÃO DIRETA

A Figura 4.8 ilustra as curvas representativas de tensão *versus* deformação obtidas nos ensaios de tração direta das matrizes AR175, AR300 e AR410.

Em seguida, a Tabela 4.5 apresenta resultados experimentais médios da tensão máxima de tração e da deformação de cada matriz.

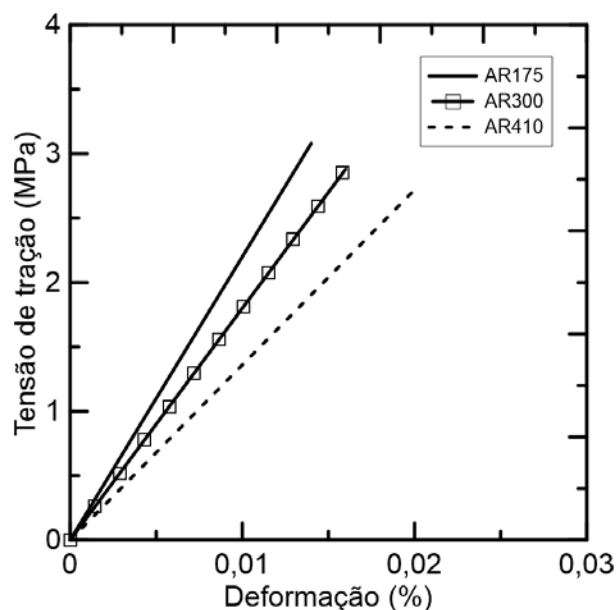


Figura 4.8: Curvas representativas de tensão *versus* deformação obtidas nos ensaios de tração direta realizados nas matrizes AR175, AR300 e AR410.

Tabela 4.5: Valores médios de tensão máxima de tração e de deformação das matrizes AR175, AR300 e AR410.

Ensaio de tração direta	Tensão máxima de tração ($\sigma_{fc} = \sigma_u$) (MPa)	Deformação (ϵ) (%)
Matriz AR175	3,14 (0,32)	0,013 (0,010)
Matriz AR300	2,86 (0,65)	0,016 (0,003)
Matriz AR410	2,70 (0,27)	0,018 (0,009)

*Valor entre parênteses: desvio padrão.

A partir dos resultados é possível observar que para a matriz com menor DMC de areia apresentou maior tensão máxima e menor capacidade de deformação quando comparada às demais matrizes. Em consequência, a matriz AR175 se apresentou como uma matriz menos favorável à abertura de fissuras à tração, visto que a mesma é mais resistente comparada às demais matrizes testadas. Os valores de tensão máxima de tração, que no caso de matrizes cimentícias sem fibras são os mesmos valores de tensão de primeira fissura, foram utilizados na construção de modelos micromecânicos de dosagem para todas as matrizes apresentadas.

4.2.3 COMPRESSÃO

As matrizes AR15, AR300 e AR410 foram avaliadas sob esforços de compressão a fim de se avaliar a influência do tamanho do grão de areia na resistência à compressão e a capacidade de deformação das mesmas. A resistência à compressão, a deformação de pico (deformação na resistência máxima), e o módulo de elasticidade E de cada matriz são apresentados na Tabela 4.6 e as curvas representativas de cada grupo são apresentadas na Figura 4.9 .

Tabela 4.6: Valores médios das propriedades mecânicas sob compressão aos 28 dias das matrizes AR175, AR300 e AR410.

Matriz	Resistência à compressão (MPa)	Deformação de pico ($\mu\epsilon$)	E (GPa)
AR175	48,65 (1,49)	3987,85 (10,40)	16,69 (5,52)
AR300	45,17 (4,05)	4269,24 (12,75)	16,47 (3,15)
AR410	47,37 (2,41)	5744,94 (11,95)	13,87 (3,50)

*Valor entre parênteses: coeficiente de variação.

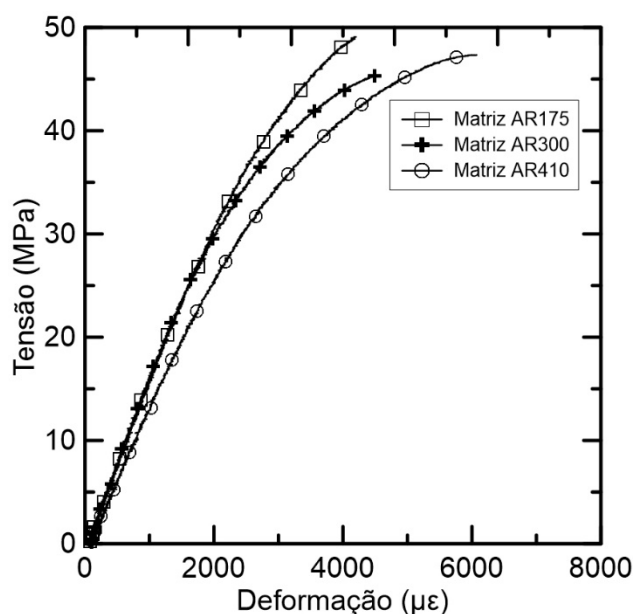


Figura 4.9: Curvas representativas de tensão *versus* deformação das matrizes AR175, AR300 e AR410.

De acordo com a Tabela 4.6 e a Figura 4.9, observa-se que as propriedades mecânicas à compressão das matrizes testadas foram similares. Em relação aos valores de resistência à compressão, todas as matrizes apresentaram valores bem

próximos, sendo que, considerando-se a capacidade de deformação, a matriz AR410 apresentou redução de 16% no valor do módulo de elasticidade em relação à matriz AR300 e redução de 17% em relação à matriz AR175. Os valores médios dos módulos de elasticidade de cada matriz foram utilizados na construção dos modelos micromecânicos de cada grupo.

4.3 INFLUÊNCIA DO TRATAMENTO ALCALINO NA ADERÊNCIA FIBRA-MATRIZ

Visto que os resultados obtidos para as fibras de juta mostraram que o tratamento alcalino foi o responsável em proporcionar às fibras melhor desempenho mecânico quando comparado aos demais, esse tratamento foi escolhido para ser aplicado nas fibras utilizadas como reforço nos compósitos. Os resultados dos ensaios de arrancamento apontaram que o limite do embebimento para fibra de juta para que não houvesse ruptura de fibra era de 7mm para a matriz AR175, sendo que para as matrizes AR300 e AR425 os resultados mostraram fratura de fibra ainda dentro do corpo de prova testado para o mesmo comprimento de embebimento.

Para os os comprimentos de embebimento de fibras de 10, 15 e 20mm não foi possível ter arrancamento de fibra, visto que a força cisalhante na interface fibra matriz foi superior a força à tração da própria fibra, ocorrendo assim a ruptura da fibra fora do corpo de prova antes de acontecer o arrancamento. Foram moldados em média 30 corpos de prova para cada matriz.

Matriz AR175

Os resultados do ensaio de arrancamento da fibra de juta da matriz AR175 antes e após o tratamento alcalino são apresentados pela Tabela 4.7 e Figura 4.10. A partir dos dados apresentados é possível concluir que o tratamento alcalino promoveu uma melhoria tanto da fase adesional quanto da fase friccional, sem promover fratura de fibra antes do arrancamento. A tensão adesional (τ_a) para as fibras tratadas em meio alcalino apresentou acréscimo de 7% em relação às fibras não tratadas, enquanto para a tensão máxima da região friccional ($\tau_{m\acute{a}x}$) o acréscimo foi de 9%. A majoração da resistência adesional se deu de forma que não houvesse ruptura de fibra para o grupo de fibras tratadas em meio alcalino.

Tabela 4.7: Resultados médios e desvio padrão do teste de arrancamento da fibra de juta na matriz AR175.

Juta	l_f (mm)	Área (μm^2)	Perímetro (μm)	P_a (N)	P_b (N)	$P_{m\acute{a}x}$ (N)	G_d (J/m^2)	$\tau_{m\acute{a}x}$ (MPa)	τ_a (MPa)
Sem tratamento	7	4401 (248)	290 (35,61)	0,85 (0,08)	0,44 (0,1)	0,89 (0,05)	6,88 (0,56)	0,44 (0,05)	0,35 (0,06)
Tratamento alcalino	7	4391 (1067)	280 (46,92)	0,92 (0,34)	0,50 (0,170)	0,93 (0,33)	13,31 (3,45)	0,47 (0,10)	0,38 (0,08)

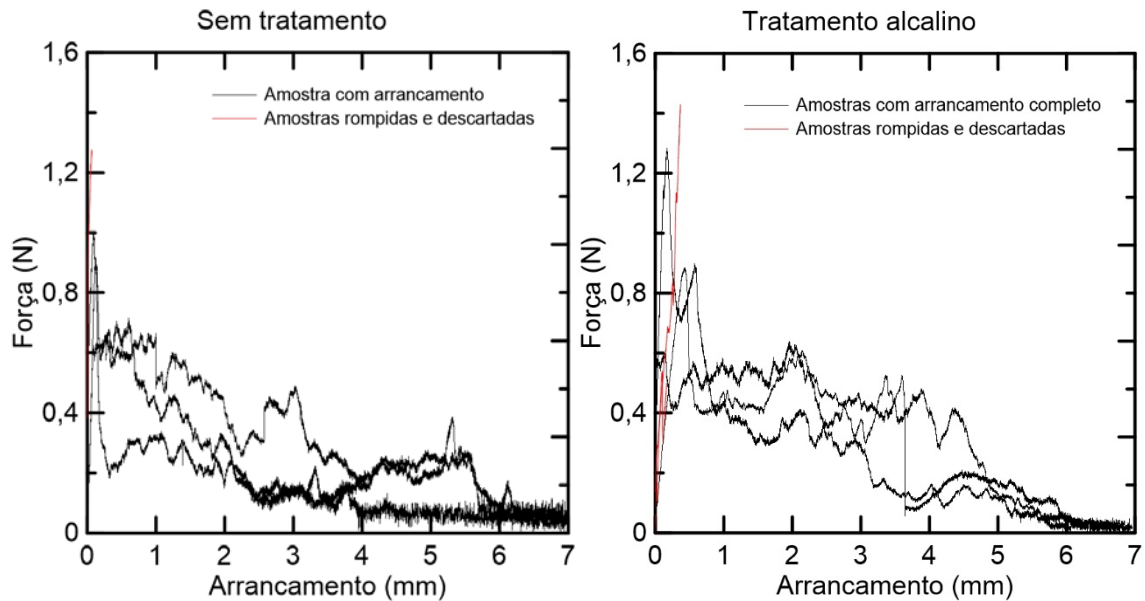


Figura 4.10: Representação gráfica do teste de arrancamento das fibras de juta não tratadas (esquerda) e tratadas em solução alcalina (direita) na matriz AR175.

Matriz AR300

Os resultados do ensaio de arrancamento da fibra de juta da matriz AR300 antes e após o tratamento alcalino são apresentados pela Tabela 4.8 e Figura 4.11. A partir dos dados apresentados é possível concluir que o tratamento alcalino promoveu uma melhoria tanto da fase adesional (τ_a) quanto da fase friccional. No entanto, no tratamento alcalino foi observado que a tensão adesional foi majorada em valor suficiente para promover fratura de fibra ainda dentro da matriz, porém com arrancamento de fibra quase completo.

Tabela 4.8: Resultados médios e desvio padrão do teste de arrancamento da fibra de juta na matriz AR300.

Juta	l_f (mm)	Área (μm^2)	Perímetro (μm)	P_a (N)	P_b (N)	$P_{m\acute{a}x}$ (N)	G_d (J/m^2)	$\tau_{m\acute{a}x}$ (MPa)	τ_a (MPa)
Sem tratamento	7	4408 (470)	345 (42)	0,79 (0,24)	0,64 (0,27)	0,94 (0,32)	0,41 (0,37)	0,38 (0,11)	0,32 (0,08)
Tratamento alcalino	7	4385 (828)	260 (90)	0,73 (0,26)	0,28 (0,19)	0,84 (0,25)	2,26 (0,37)	0,48 (0,13)	0,40 (0,14)

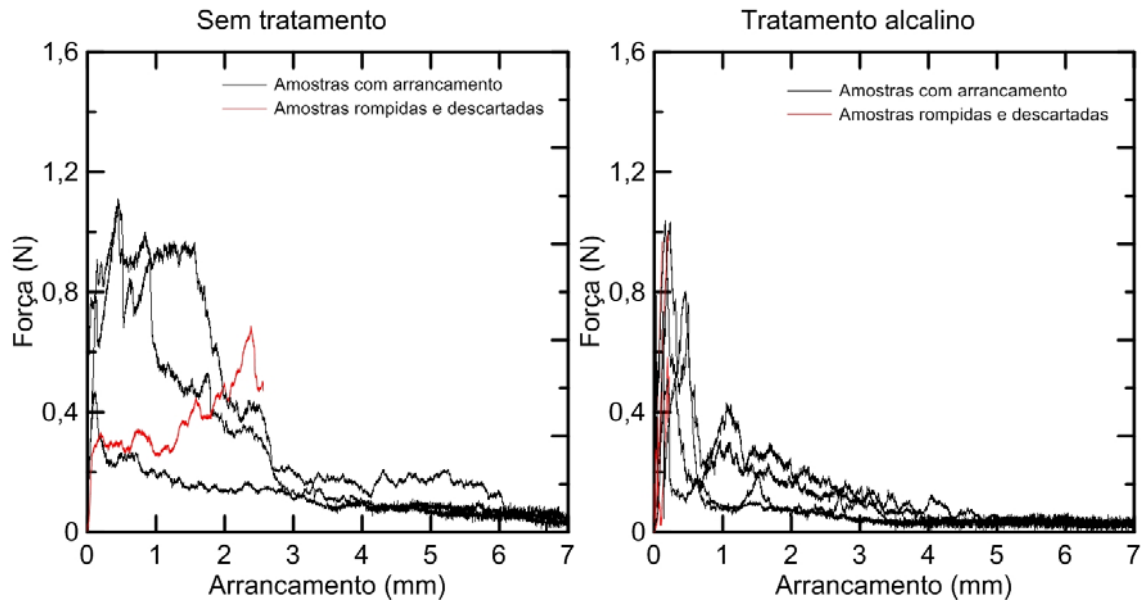


Figura 4.11: Representação gráfica do teste de arrancamento das fibras de juta não tratadas (esquerda) e tratadas em solução alcalina (direita) na matriz AR300.

Matriz AR410

A Tabela 4.9 e a Figura 4.12 mostram os resultados do ensaio de arrancamento da fibra de juta da matriz AR410 antes e após o tratamento alcalino. Assim como ocorreu para a matriz AR300, é possível observar que o tratamento alcalino promoveu uma melhora tanto da fase adesional (τ_a) quanto da fase friccional. No entanto, que a tensão adesional foi majorada em valor suficiente para promover fratura de fibra ainda dentro da matriz.

Tabela 4.9: Resultados médios e desvio padrão do teste de arrancamento da fibra de juta na matriz AR410.

Juta	l_f (mm)	Área (μm^2)	Perímetro (μm)	P_a (N)	P_b (N)	$P_{m\acute{a}x}$ (N)	G_d (J/m^2)	$\tau_{m\acute{a}x}$ (MPa)	τ_a (MPa)
Sem tratamento	7	3325 (651)	283 (88)	0,55 (0,30)	0,38 (0,20)	0,63 (0,32)	0,85 (0,30)	0,30 (0,14)	0,28 (0,14)
Tratamento alcalino	7	3139 (1045)	232 (37)	1,35 (0,31)	0,88 (0,57)	1,46 (0,31)	2,91 (1,82)	0,52 (0,22)	0,45 (0,18)

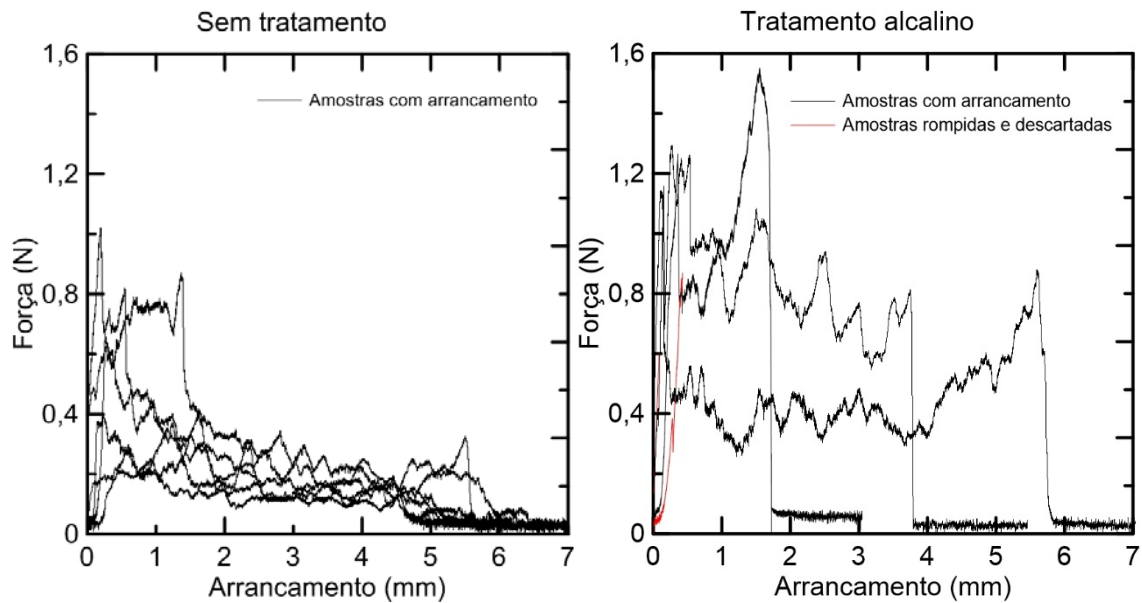


Figura 4.12: Representação gráfica do teste de arrancamento das fibras de juta não tratadas (esquerda) e tratadas em solução alcalina (direita) na matriz AR410.

Em relação aos resultados obtidos, conclui-se que o tratamento alcalino se demonstrou eficiente para majoração do valor da tensão máxima na região friccional em todas as matrizes cimentícias. No entanto, para as matrizes AR300 e AR410 a tensão adesional aumentou de forma suficiente a promover ruptura de fibra ainda dentro da matriz.

Os resultados apresentados mostraram que para fibras não tratadas, o tamanho do grão máximo de areia não exerce influência considerável nos valores de tensão adesional e friccional. No entanto, para as fibras alcalinas foi possível observar que quanto maior o tamanho do grão de areia, maior também foi o valor de tensão adesional e friccional, ou seja, maior foi aderência fibra-matriz.

4.4 MODELO MICROMECAÂNICO DE DOSAGEM

Para cada matriz desenvolvida neste trabalho foi desenhado um modelo micromecânico de dosagem considerando como parâmetros de entrada os resultados da matriz, da fibra tratada em solução alcalina e da interface fibra-matriz, obtidos experimentalmente. O diâmetro (d_f) das fibras foi estimado como um diâmetro circular a partir da área das fibras obtidas pela análise das imagens no MEV no software ImageJ. O comprimento (L_f) das fibras foi ajustado para 20mm no modelo para que os critérios exigidos pelo modelo fossem obedecidos. O módulo de elasticidade da matriz (E) e o valor da tenacidade ou energia de fratura (J_{tip}), foram obtidos por meio dos ensaios de compressão axial e teste de fratura, respectivamente. O valor da energia química de ligação (G_d) e da tensão máxima de ligação entre a fibra e a matriz ($\tau_{máx}$) foram obtidos por meio do ensaio de arrancamento fibra-matriz. O valor da tensão de primeira fissura da matriz (σ_{fc}) foi obtida por meio de ensaios de tração direta. Foi realizada uma estimativa de volume de fibras (V_f) de 4% como parâmetro de entrada, o que se justifica pelo fato de ser esse volume um volume limite para que se tenha uma consistência trabalhável do compósito.

Para os casos em que as matrizes com V_f de entrada de 4% de fibras não passaram nos critérios de resistência e energia exigidos no modelo ou calcularam um volume crítico de fibras inviável de ser moldado, foram realizadas variações dos valores da tensão de primeira fissura da matriz, a fim de obedecer ambos os critérios simultaneamente e se estimar um volume crítico de fibras viável de ser utilizado no processo de moldagem.

4.4.1 MODELOS PARA A MATRIZ AR175

A Tabela 4.10 ilustra os valores utilizados como parâmetros de entrada nos modelos micromecânicos de dosagem para a matriz AR175 com fibras tratadas em solução alcalina.

Em seguida, na Tabela 4.11 são apresentados os resultados obtidos por meio do desenvolvimento dos modelos.

O critério de energia não foi obedecido ($PSH_{energia} < 1$), visto que a energia de tenacidade (J_{tip}) da matriz AR175 foi muito superior à energia complementar (J'_b) estimada pelo modelo. Em consequência, o volume crítico de fibras calculado pelo modelo não é considerado válido.

Como não foram obedecidos os critérios de resistência e energia simultaneamente, não foi possível associar um volume crítico de fibras necessário para ocorrer comportamento de endurecimento na tração direta na mistura dessas fibras com a matriz AR175.

Buscando obedecer ambos os critérios exigidos pelo modelo e obter um volume crítico viável e possível de moldagem para fibras vegetais, o valor da tensão de primeira fissura foi variado no modelo para valores menores aos valores reais da matriz AR175. Foi possível observar que mesmo para valores de até 0,5 MPa de resistência, os critérios não foram obedecidos. Isso porque o critério não obedecido nesse caso é o $PSH_{energia}$, que depende exclusivamente dos parâmetros da fibra, da interface fibra-matriz e da energia de fratura da matriz. Logo, a mudança de resistência da matriz não interfere nesse critério, e sim no critério $PSH_{resistência}$. A diminuição da resistência da matriz promoveu a redução do volume crítico de fibras necessário para que o critério de resistência fosse obedecido. Como ambos os critérios não foram obedecidos para a matriz de resistência de primeira fissura estimada em 0,5 MPa, não foi possível associar um volume crítico de fibras necessário para ocorrer comportamento de endurecimento na tração direta de compósitos produzidos a partir dessa matriz com reforço de fibras alcalinas.

Tabela 4.10: Parâmetros de entrada nos modelos teóricos de dosagem para a matriz AR175 e para a simulação realizada.

Descrição	Fibra				Matriz		Interface		Critério de Resistência
	V_f %	L_f mm	d_f μm	E_f Gpa	E Gpa	J_{tip} J/m ²	G_d J/m ²	$\tau_{máx}$ MPa	σ_{fc} MPa
Matriz AR175	4	20	50	36	16,69	26,58	13,31	0,47	3,14
Simulação	4	20	50	36	16,69	26,58	13,31	0,47	0,5

Tabela 4.11: Resultados obtidos por meio dos modelos teóricos de dosagem para a matriz AR175 e para a simulação realizada.

Descrição	Critério de Resistência		Critério de Energia		Volume crítico	
	σ_0 MPa	$PSH_{resistência}$	J'_b J/m ²	$PSH_{energia}$	$V_{resistência}$ %	$V_{energia}$ %
Matriz AR175	11,60	3,69	-	-	-	-
Simulação	11,60	23,196	-	-	-	-

4.4.2 MODELOS PARA A MATRIZ AR300

A Tabela 4.12 apresenta os valores utilizados como parâmetros de entrada nos modelos micromecânicos de dosagem para a matriz AR300 com fibras tratadas em solução alcalina.

Tabela 4.12: Parâmetros de entrada nos modelos teóricos de dosagem para a matriz AR300 e para as simulações realizadas.

Descrição	Fibra				Matriz		Interface		Critério de Resistência
	V_f %	L_f mm	d_f μm	E_f Gpa	E Gpa	J_{tip} J/m ²	G_d J/m ²	$\tau_{m\acute{a}x}$ MPa	σ_{fc} MPa
Matriz AR300	4	20	50	36	16,47	22,12	2,26	0,48	2,86
Simulação A	4	20	50	36	16,47	22,12	2,26	0,48	2,00
Simulação B	4	20	50	36	16,47	22,12	2,26	0,48	1,50

Na Tabela 4.13 são apresentados os resultados obtidos por meio dos modelos micromecânicos.

Tabela 4.13: Resultados obtidos por meio dos modelos teóricos de dosagem para a matriz AR300 e para as simulações realizadas.

Descrição	Critério de Resistência		Critério de Energia		Volume crítico	
	σ_0 MPa	$PSH_{resist\acute{e}ncia}$	J'_b J/m ²	$PSH_{energia}$	$V_{resist\acute{e}ncia}$ %	$V_{energia}$ %
Matriz AR300	8,36	2,92	64,21	2,90	5,5	4
Simulação A	8,36	4,18	64,21	2,90	3,83	4
Simulação B	8,36	5,57	64,21	2,90	2,87	4

Para o caso da matriz AR300, é possível observar, por meio da Tabela 4.13, que tanto o critério de resistência ($PSH_{resist\acute{e}ncia} \geq 1$), quanto o critério de energia ($PSH_{energia} \geq 1$), foram obedecidos nos modelos para juta tratada com solução alcalina. Isso significa que para os parâmetros de entrada referentes a essa matriz, a capacidade da fibra é suficiente para garantir que exista uma possível zona do comportamento de endurecimento na tração direta no compósito, sendo que para que isso ocorra é requerido um volume crítico de fibras de 5,5%, o que torna o processo de moldagem inviável.

Visando obedecer ambos os critérios exigidos pelo modelo e obter um volume crítico viável e possível de moldagem para fibras vegetais, o valor da tensão de primeira fissura foi variado no modelo para valores menores aos valores reais da matriz AR300.

Por meio da variação dos valores da tensão de primeira fissura da matriz foi possível observar que para a resistência de 2 MPa ambos os critérios exigidos eram obedecidos, sendo o volume crítico de fibras estimado pelo modelo de 3,83% para cumprimento do critério de resistência. Visto que apenas a resistência de primeira fissura foi variada, não houve modificação no volume de fibras requerido pelo critério de energia em relação a matriz original de 2,86 MPa, porém ainda assim é possível inferir que para uma matriz com 2 MPa de resistência na tração a energia de fratura seria também minorada em relação a matriz original de 2,86 MPa na tração, o que seria favorável no modelo, visto que com menor energia de fratura ele apontaria um menor volume crítico para cumprimento desse critério. Diante disso é possível concluir de forma conservadora que o volume de fibras estimado para cumprimento de ambos critérios foi de 4% para matrizes com resistência de 2 MPa.

Após ter sido feita a estimativa com a matriz de resistência de 2 MPa na tração, foi realizada mais uma estimativa com o objetivo de diminuição do volume requerido de fibras para cumprimento de ambos os critérios do modelo. Foi estimada uma segunda tensão de primeira fissura para a matriz, com valor de 1,5 MPa. Para esta resistência de matriz foi observado que ambos os critérios eram obedecidos pelo modelo, sendo que o volume crítico de fibras requerido para cumprimento do critério de resistência foi reduzido para 2,87%.

As Figura 4.13, Figura 4.14, e Figura 4.15 ilustram as curvas do volume requerido de fibras em função da tensão friccional entre fibra-matriz para cada modelo desenvolvido.

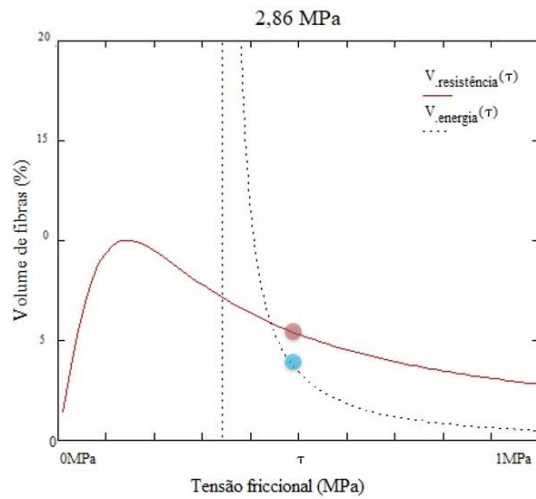


Figura 4.13: Modelo teórico de dosagem para matriz AR300.

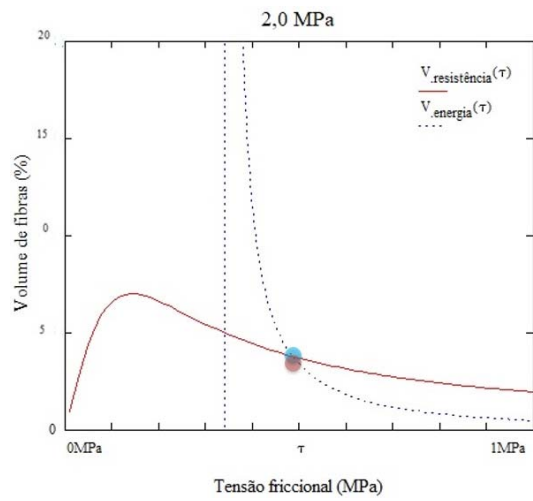


Figura 4.14: Modelo teórico de dosagem para a estimativa A.

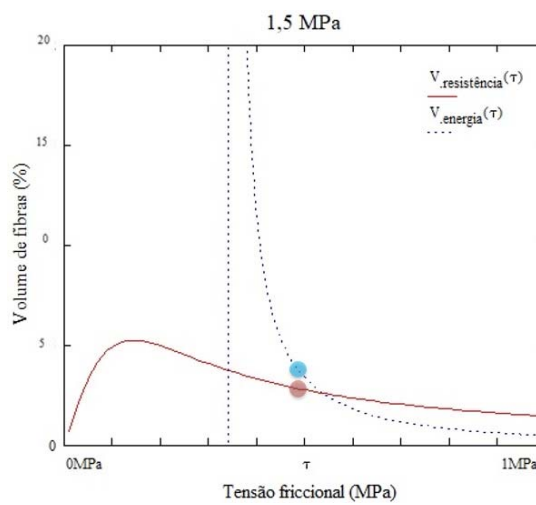


Figura 4.15: Modelo teórico de dosagem para a estimativa B.

4.4.3 MODELOS PARA A MATRIZ AR410

Os parâmetros de entrada nos modelos micromecânicos de dosagem para a matriz AR410 com fibras tratadas em solução alcalina são apresentadas na Tabela 4.14.

Tabela 4.14: Parâmetros de entrada nos modelos teóricos de dosagem para a matriz AR410 e para as simulações realizadas.

Descrição	Fibra				Matriz		Interface		Critério de Resistência
	V_f %	L_f mm	d_f μm	E_f Gpa	E Gpa	J_{tip} J/m ²	G_d J/m ²	$\tau_{m\acute{a}x}$ MPa	σ_{fc} MPa
Matriz AR410	4	20	50	36	13,87	16,63	2,91	0,52	2,70
Simulação A	4	20	50	36	13,87	16,63	2,91	0,52	2,0
Simulação B	4	20	50	36	13,87	16,63	2,91	0,52	1,50

Na Tabela 4.15 são apresentados os resultados obtidos por meio dos modelos micromecânicos.

Tabela 4.15: Resultados obtidos por meio dos modelos teóricos de dosagem para a matriz AR410 e para as simulações realizadas.

Descrição	Critério de Resistência		Critério de Energia		Volume crítico	
	σ_0 MPa	$PSH_{resist\acute{e}ncia}$	J'_b J/m ²	$PSH_{energia}$	$V_{resist\acute{e}ncia}$ %	$V_{energia}$ %
Matriz AR410	9,13	3,38	67,12	4,036	5,05	4
Simulações A	9,13	4,56	67,12	4,036	3,51	4
Simulações B	9,13	6,08	67,12	4,036	2,63	4

Como é possível observar pela Tabela 4.15, os modelos teóricos de dosagem desenvolvidos para a matriz AR410 obedecem o critério de resistência ($PSH_{resist\acute{e}ncia} \geq 1$) e de energia ($PSH_{energia} \geq 1$) simultaneamente. Isso significa que para os parâmetros de entrada referentes a essa matriz, a capacidade da fibra é suficiente para garantir que exista uma possível zona do comportamento de endurecimento na tração direta no compósito, sendo que para que isso ocorra é requerido um volume crítico de fibras de 5,05%, o que torna o processo de moldagem inviável.

Buscando-se obedecer ambos os critérios exigidos pelo modelo e obter um volume crítico viável e possível de moldagem para fibras vegetais, o valor da tensão

de primeira fissura foi variado no modelo para valores menores aos valores reais da matriz AR410.

Por meio da variação dos valores da tensão de primeira fissura da matriz foi possível observar que para a resistência de 2 MPa ambos os critérios exigidos eram obedecidos, sendo o volume crítico de fibras estimado pelo modelo de 3,51% para cumprimento do critério de resistência. Visto que apenas a resistência de primeira fissura foi variada, não houve modificação no volume de fibras requerido pelo critério de energia em relação a matriz original de 2,70 MPa, porém ainda assim é possível inferir que para uma matriz com 2 MPa de resistência na tração a energia de fratura seria também minorada em relação a matriz original de 2,70 MPa na tração, o que seria favorável no modelo, visto que com menor energia de fratura ele apontaria um menor volume crítico para cumprimento desse critério. Diante disso é possível concluir de forma conservadora que o volume de fibras estimado para cumprimento de ambos critérios foi de 4% para matrizes com resistência de 2 MPa.

Foi também realizada uma segunda estimativa com o objetivo de diminuição do volume requerido de fibras para cumprimento de ambos os critérios do modelo. Para tensão de primeira fissura da matriz estimada em 1,5 MPa foi observado que ambos os critérios eram obedecidos pelo modelo, sendo que o volume crítico de fibras requerido para cumprimento do critério de resistência foi reduzido para 2,63%.

As Figura 4.16, Figura 4.17, e Figura 4.18 ilustram as curvas do volume requerido de fibras em função da tensão friccional entre fibra-matriz para cada modelo construído.

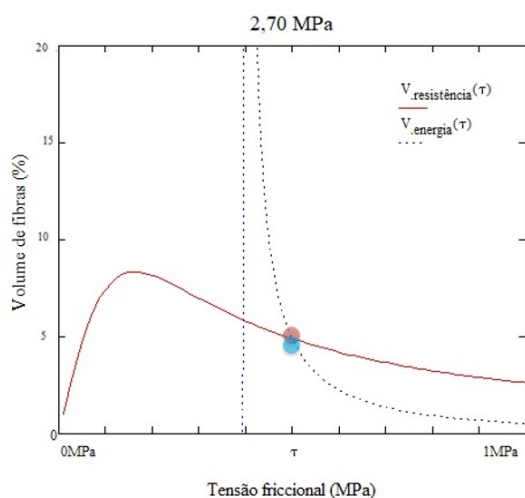


Figura 4.16: Modelo teórico de dosagem para matriz AR410.

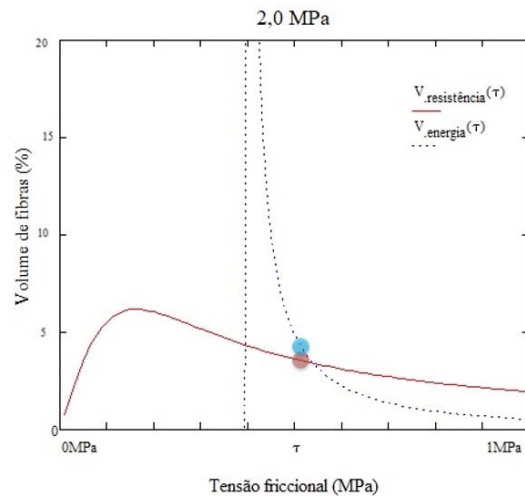


Figura 4.17: Modelo teórico de dosagem para a estimativa A.

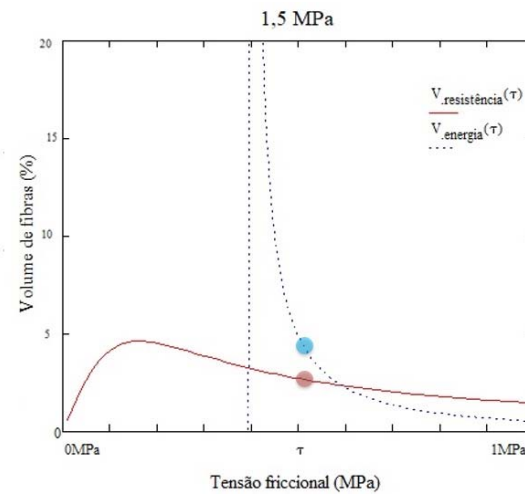


Figura 4.18: Modelo teórico de dosagem para a estimativa B.

4.5 COMPÓSITOS CIMENTÍCIOS

Com base nos resultados obtidos nos modelos micromecânicos desenvolvidos para as matrizes deste trabalho, foi possível concluir que para estas mesmas matrizes o volume crítico de fibras requerido para que os compósitos apresentassem endurecimento na tração direta era grande suficiente para tornar inviável o processo de moldagem devido à falta de trabalhabilidade da mistura. No entanto, para as estimativas realizadas variando o valor de tensão máxima das matrizes, os modelos apontaram teores de 3-4% de fibras como o volume crítico necessário para que os compósitos apresentassem endurecimento na tração direta.

A partir disso, para validação do modelo, foram moldadas misturas com teores de 3 e 4% de fibras de 20mm com as matrizes AR300 e AR410. Ainda que, baseado nos resultados dos modelos, esses compósitos não apresentassem comportamento de endurecimento na tração direta com esses teores de fibras, a moldagem dessas misturas se justificou pela necessidade de verificação dos valores de tensões últimas dos compósitos. Para validação do modelo, os compósitos ensaiados na tração deveriam apresentar tensões últimas próximas das tensões estimadas nos modelos desenvolvidos.

4.5.1 CONSISTÊNCIA PADRÃO

Foram realizados ensaios de consistência padrão, segundo a norma NBR 13276 (ABNT, 2005), para todas as misturas produzidas com a adição de fibras. A Tabela 4.16 apresenta os resultados obtidos nos ensaios realizados. Na Figura 4.19 são ilustrados os espalhamentos das misturas desenvolvidas a partir das matrizes AR300 e AR410 com adição de teores de 3-4% de fibras tratadas.

Tabela 4.16: Valores de espalhamento para as misturas produzidas com adição de fibras.

Mistura	Espalhamento (mm)
Matriz AR300 com 3% de fibra alcalina	220
Matriz AR300 com 4% de fibra alcalina	185
Matriz AR410 com 3% de fibra alcalina	230
Matriz AR410 com 4% de fibra alcalina	185

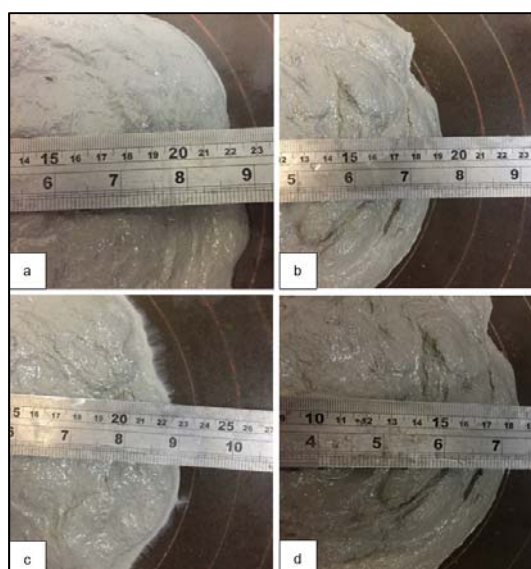


Figura 4.19: Espalhamento das misturas produzidas a partir da adição de fibras na matriz (a) AR300 - 3% de fibras, (b) AR300 - 4% de fibras, (c) AR410 - 3% de fibras, (d) AR410 - 3% de fibras.

Os resultados obtidos mostram que quanto maior o incremento de fibras nas matrizes, menores são os espalhamentos.

4.5.2 TRAÇÃO

Matriz AR300 reforçada com fibras curtas de juta

Os resultados dos ensaios de tração realizados nos compósitos produzidos com a matriz AR300 e adição de 3 e 4% de fibras, estão apresentados na Figura 4.20 e na Tabela 4.17.

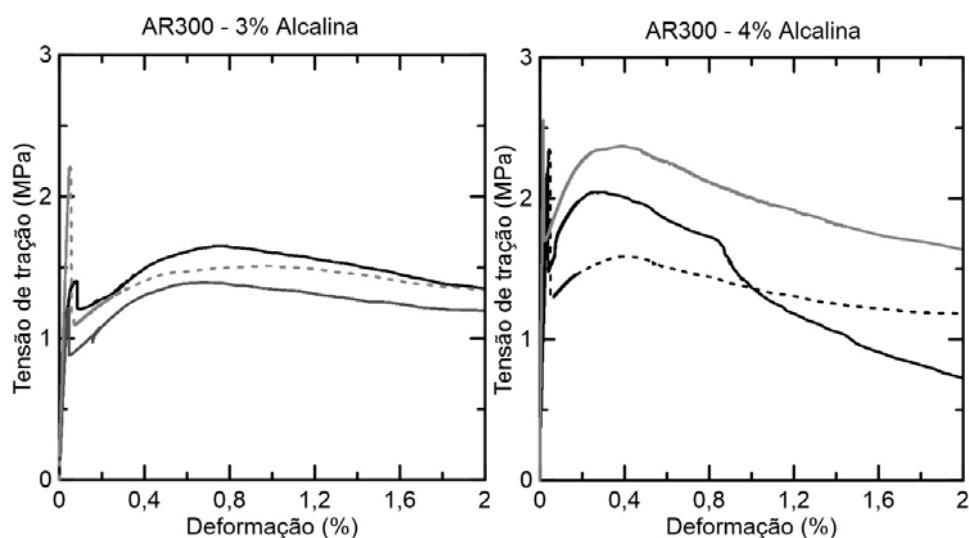


Figura 4.20: Curvas tensão-deformação dos compósitos produzidos com adição de 3 e 4% de fibras na matriz AR300.

Tabela 4.17: Resultados médios das propriedades em tração dos compósitos da matriz AR300 reforçados com juta e desvio padrão.

Ensaio de tração direta	σ_f (MPa)	ϵ_f (%)	σ_u (MPa)	ϵ_u (%)	Nº de fissuras
AR300 - 3% alcalina	1,61 (0,53)	0,06 (0,03)	1,51 (0,13)	0,79 (0,16)	1
AR300 - 4% alcalina	2,41 (0,12)	0,04 (0,02)	1,99 (0,39)	0,34 (0,07)	1

*Valor entre parênteses: desvio padrão.

Os resultados obtidos mostram que para os compósitos reforçados com 3% de fibras de juta tratada, apresentaram média da tensão de primeira fissura de 1,61 MPa (em uma das misturas atingiu 2,2MPa), justificando a não formação de múltiplas fissuras. Tal resultado confirma o resultado obtido no modelo micromecânico de

dosagem, já que o modelo estimou que o volume crítico de fibras deveria ser maior que 3% para uma resistência de primeira fissura superior a 1,5 MPa. Note que a máxima tensão pós-fissuração do compósito foi de 1,5 MPa.

Para compósitos reforçados com 4% de fibras, nota-se que a tensão de primeira fissura apresentada pelo compósito foi de 2,41 MPa. O modelo estimou que 4% era o volume necessário para endurecimento na tração direta quando a resistência da matriz fosse aproximadamente 2 MPa. E a máxima tensão de pós fissuração de 1,99MPa obtida no estudo confirma o modelo. Uma fração de fibras maior deveria ter sido utilizada para se garantir o completo controle do processo de fratura, porém a falta de trabalhabilidade com frações maiores a 4% de fibras tornaram inviável a moldagem com um teor de fibra superior a 4%.

A Figura 4.21 ilustra o modo de fratura do grupo de compósitos reforçados com 3% de fibras de juta tratadas em solução alcalina. Nesse grupo foi possível observar que houve a formação de uma única fissura visível. Na Tabela 4.18 é apresentada a densidade de fissuras no terço central do corpo de prova, assim como os valores de abertura das fissuras em função da deformação imposta. A Figura 4.22 apresenta a curva tensão-deformação-abertura de fissuras. Nesse compósito é possível observar que o tamanho da abertura média da fissura aumentou de 200 para 300 μ m desde o momento de observação da primeira fissura visível (0,05%) até o momento da máxima tensão máxima na região pós-fissuração ($\epsilon = 0,97\%$).

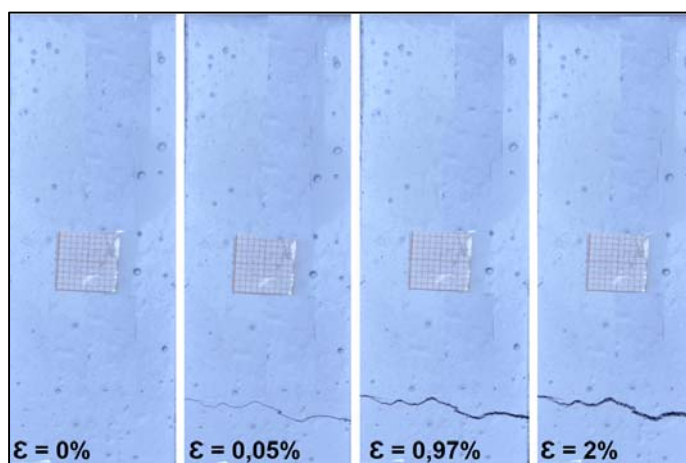


Figura 4.21: Abertura da fissura na sequência das deformações do compósito representativo do grupo de 3% de fibras alcalinas na matriz AR300.

Tabela 4.18: Espaçamento e abertura de fissuras dos compósitos reforçados com 3% de fibras alcalinas na matriz AR300.

Deformação (%)	Fissuras (f)	Densidade de fissura (f/mm)	Espaçamento (mm)	Abertura média das fissuras (μm)
0	0	0,00	80,00	0,00
0,05	1	0,01	40,00	209,79
0,97	1	0,01	40,00	300,18

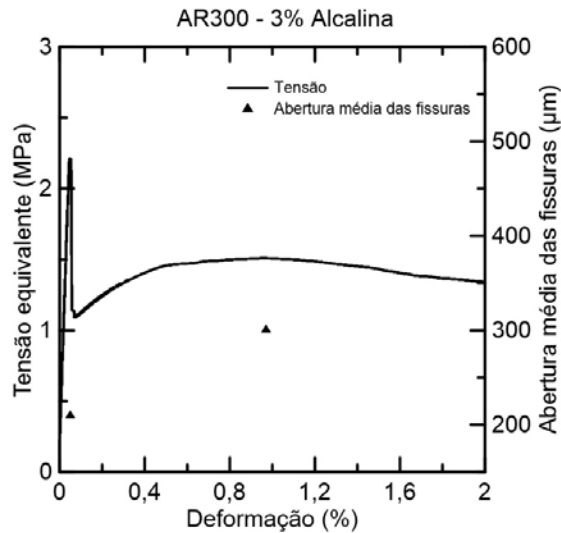


Figura 4.22: Curva tensão-deformação com os correspondentes valores de aberturas de fissuras do compósito representativo do grupo de 3% de fibras alcalinas na matriz AR300.

A Figura 4.23 mostra a abertura média das fissuras com as deformações impostas enquanto que na Tabela 4.19 são apresentados os valores da densidade de fissura, espaçamento e tamanho médio das aberturas das fissuras.

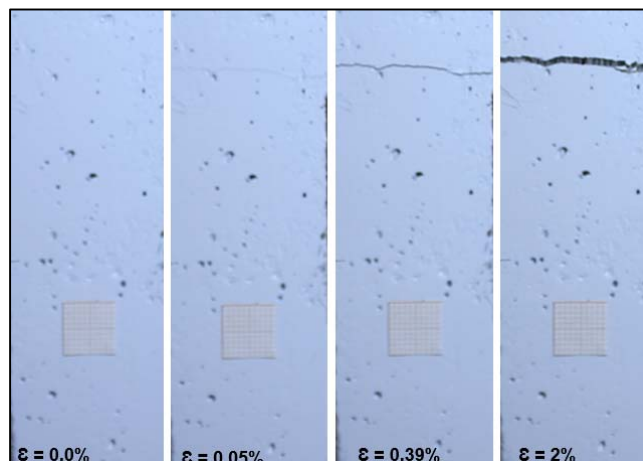


Figura 4.23: Abertura da fissura na sequência das deformações do compósito representativo do grupo de 4% de fibras alcalinas na matriz AR300.

Tabela 4.19: Espaçamento e abertura de fissuras dos compósitos reforçados com 4% de fibras alcalinas na matriz AR300.

Deformação (%)	Fissuras (f)	Densidade de fissura (f/mm)	Espaçamento (mm)	Abertura média das fissuras (µm)
0	0	0,00	80,00	0,00
0,05	1	0,01	40,00	318,00
0,39	1	0,01	40,00	343,95

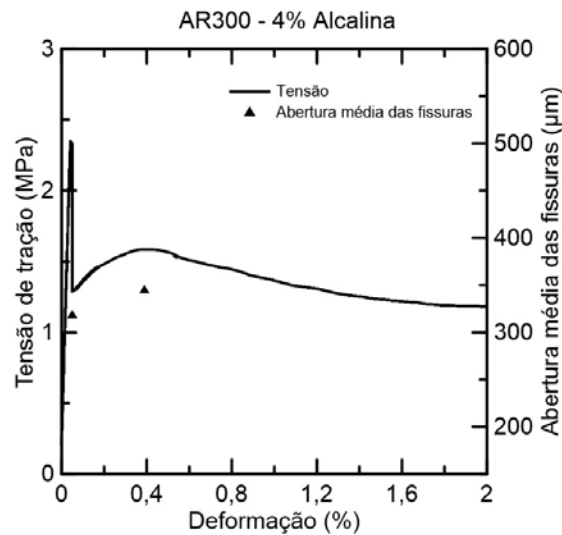


Figura 4.24: Curva tensão-deformação com os correspondentes valores de aberturas de fissuras do compósito representativo do grupo de 4% de fibras alcalinas na matriz AR300.

Na Figura 4.24, apresenta-se a curva tensão-deformação-abertura média de fissuras. Para esse compósito é possível observar que o tamanho da abertura média da fissura se manteve praticamente constante (300-330µm) até o momento da tensão máxima na região pós-fissuração ($\epsilon = 0,4\%$) o que é significativamente diferente do que foi observado para a mistura reforçada com 3% de fibras.

Matriz AR410 reforçada com fibras curtas de juta

A Figura 4.25 e a Tabela 4.20 apresentam os resultados dos ensaios de tração realizados nos compósitos produzidos com a matriz AR300 e adição de 3 e 4% de fibras.

Os dados obtidos mostram que para os compósitos reforçados com 3% de fibras de juta tratada, a tensão última média atingida foi de 1,78 MPa, valor menor que a média da tensão de primeira fissura dos compósitos (2,27 MPa), justificando a não formação de múltiplas fissuras. Tal resultado confirma o resultado obtido no modelo

micromecânico de dosagem, já que o modelo estimou que o volume crítico de fibras deveria ser maior que 3% para uma resistência de primeira fissura superior a 1,5 MPa. Note que a máxima tensão pós-fissuração do compósito foi de 1,5 MPa.

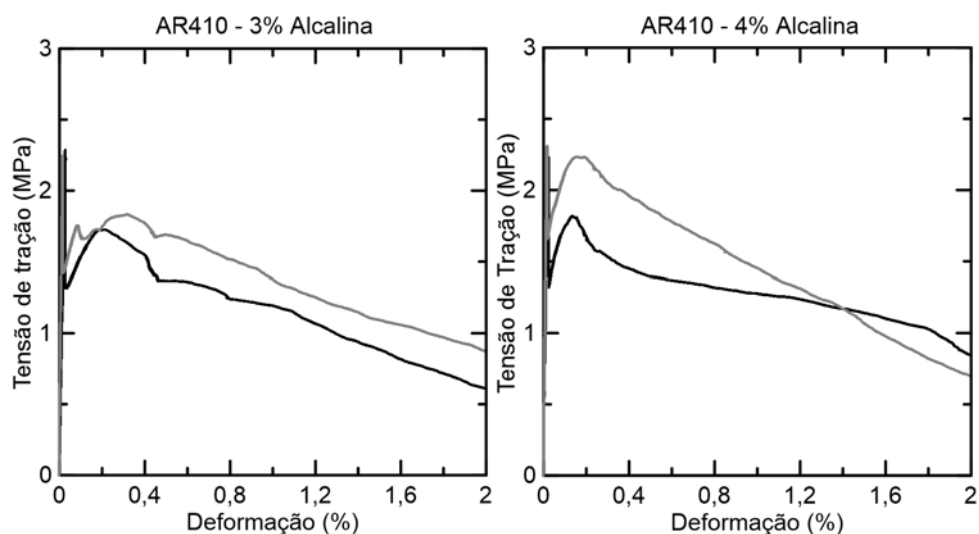


Figura 4.25: Curvas tensão-deformação dos compósitos produzidos a partir da matriz AR410 com 3% e 4% de reforço com fibras.

Tabela 4.20: Resultados médios das propriedades em tração dos compósitos da matriz AR410 reforçados com juta e desvio padrão.

Ensaio de tração direta	σ_f (MPa)	ϵ_f (%)	σ_u (MPa)	ϵ_u (%)	Nº de fissuras
AR410 - 3% alcalina	2,27 (0,04)	0,03 (0,01)	1,78 (0,08)	0,27 (0,06)	1
AR410 - 4% alcalina	2,27 (0,06)	0,03 (0,01)	2,02 (0,30)	0,17 (0,03)	1

*Valor entre parênteses: desvio padrão.

Para compósitos reforçados com 4% de fibras, nota-se que a tensão de primeira fissura apresentada pelo compósito foi de 2,27 MPa. O modelo estimou que 4% era o volume necessário para endurecimento na tração direta quando a resistência da matriz fosse aproximadamente 2 MPa e a máxima tensão de pós fissuração de 2,02 MPa obtida no estudo confirma o modelo. Uma fração de fibras maior deveria ter sido utilizada para se garantir o completo controle do processo de fratura.

A Figura 4.26 ilustra o modo de fratura do grupo de compósitos reforçados com 3% de fibras de juta tratadas em solução alcalina. Nesse grupo foi possível observar que houve a formação de uma única fissura visível e semi-fissuras.

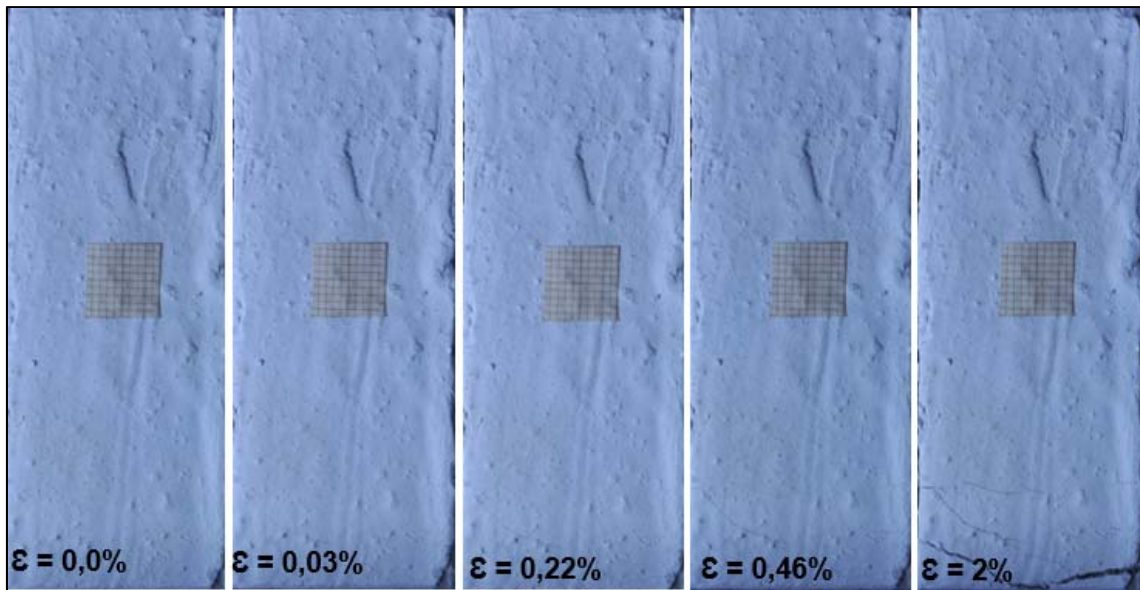


Figura 4.26: Abertura das fissuras na sequência das deformações do compósito representativo do grupo de 3% de fibras alcalinas na matriz AR410.

Na Tabela 4.21, é apresentada a densidade de fissuras no terço central do corpo de prova, assim como os valores de abertura das fissuras em função da deformação imposta. A Figura 4.27 apresenta a curva tensão-deformação-abertura de fissuras. Nesse compósito é possível observar que o tamanho da abertura média da fissura se manteve praticamente constante (200-230 μm) desde o momento de observação da primeira fissura visível ($\epsilon = 0,03\%$) até o momento da máxima tensão máxima na região pós-fissuração ($\epsilon = 0,46\%$).

Tabela 4.21: Cálculo de espaçamento e abertura de fissuras do compósito representativo do grupo de 3% de fibras alcalinas na matriz AR410.

Deformação	Fissuras	Densidade de fissura	Espaçamento	Abertura média das fissuras
(%)	(f)	(f/mm)	(mm)	(μm)
0	0	0,00	80,00	0,00
0,03	1	0,01	40,00	200,68
0,22	1	0,01	40,00	232,66
0,46	1	0,01	40,00	233,61

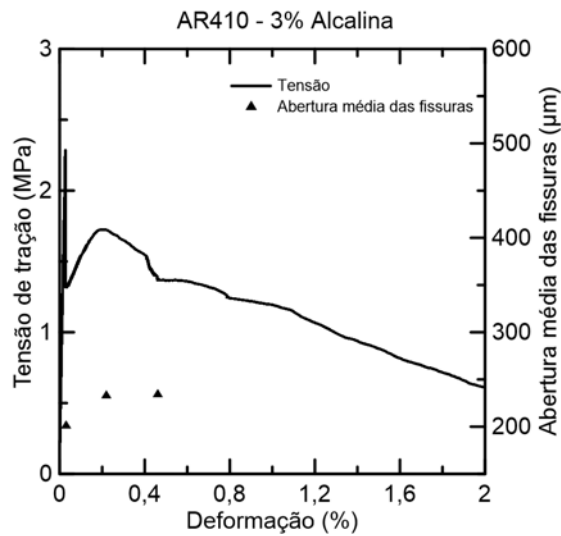


Figura 4.27: Curva tensão-deformação com os correspondentes valores de aberturas de fissuras do compósito representativo do grupo de 3% de fibras alcalinas na matriz AR410.

O compósito produzido com 4% de fibras na matriz AR410 apresentou comportamento de amolecimento e está apresentado na Figura 4.28, na seqüência das deformações.

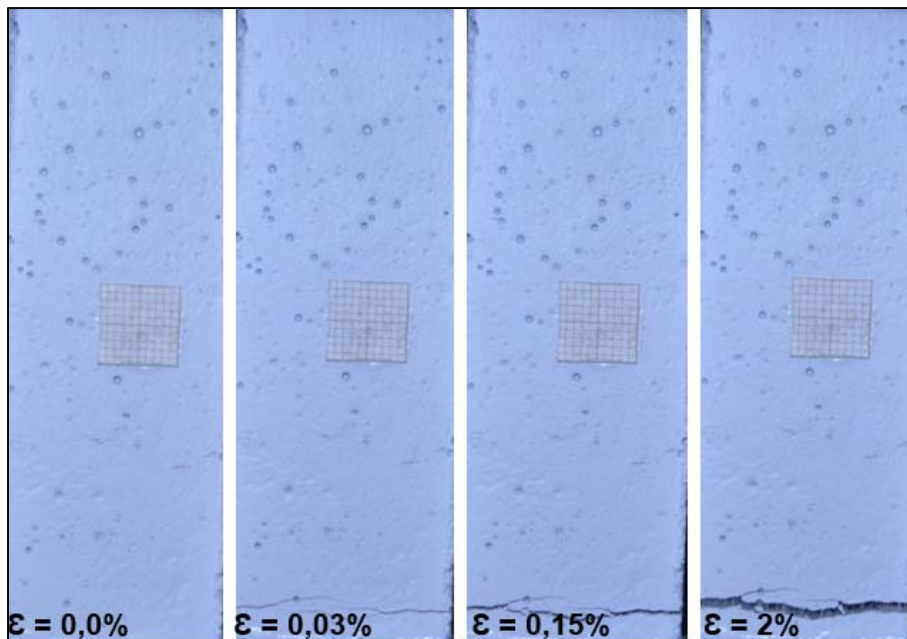


Figura 4.28: Abertura da fissura na seqüência das deformações do compósito representativo do grupo de 4% de fibras alcalinas na matriz AR410.

A Tabela 4.22 apresenta os resultados de densidade, espaçamento e abertura média da fissura do compósito reforçado com 4% de fibras tratadas em solução

alcalina. Em seguida, a Figura 4.29 ilustra a curva tensão-deformação em função do valor da abertura média de fissuras.

Tabela 4.22: Cálculo de espaçamento e abertura de fissuras do compósito representativo do grupo de 4% de fibras alcalinas na matriz AR410.

Deformação (%)	Fissuras (f)	Densidade de fissura (f/mm)	Espaçamento (mm)	Abertura média das fissuras (µm)
0	0	0,00	80,00	0,00
0,03	1	0,01	40,00	246,00
0,15	1	0,01	40,00	398,09

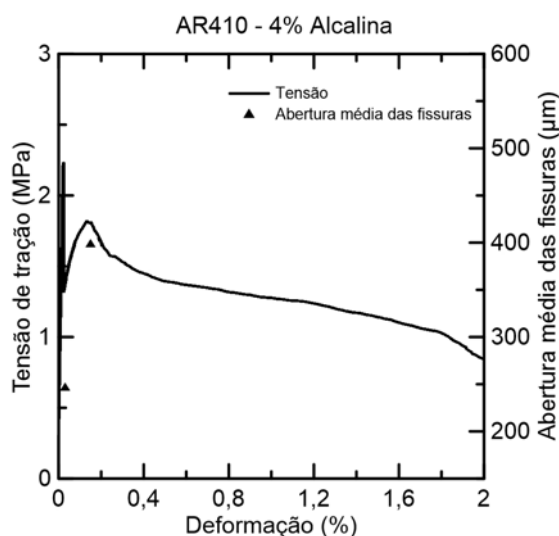


Figura 4.29: Curva tensão-deformação com os correspondentes valores de aberturas de fissuras do compósito representativo do grupo de 4% de fibras alcalinas na matriz AR410.

Para esse compósito é possível observar que o tamanho da abertura média da fissura apresentou variação entre 246 e 398 µm até o momento da tensão máxima na região pós-fissuração ($\epsilon = 0,15\%$).

4.5.3 FLEXÃO

Matriz AR300 reforçada com fibras curtas de juta

A Figura 4.30 mostra curvas tensão-deflexão dos compósitos produzidos com a matriz AR300 reforçada com 3 e 4% de fibras de juta tratadas em meio alcalino.

Na Tabela 4.23 apresenta-se os valores de tensão e deformação de primeira fissura, da máxima tensão pós-fissuração e respectiva deformação e do número de fissuras que ocorrem durante o ensaio. Os resultados obtidos mostram valores de

tensão de primeira fissura e de máxima tensão pós-fissuração da ordem de 3,7 MPa e que esses valores não variam expressivamente para os volumes de fibra utilizados. A maior diferença está relacionada ao controle do processo de fratura já que quando 4% de fibras de juta é utilizado praticamente se dobra o número de fissuras durante o processo de fratura.

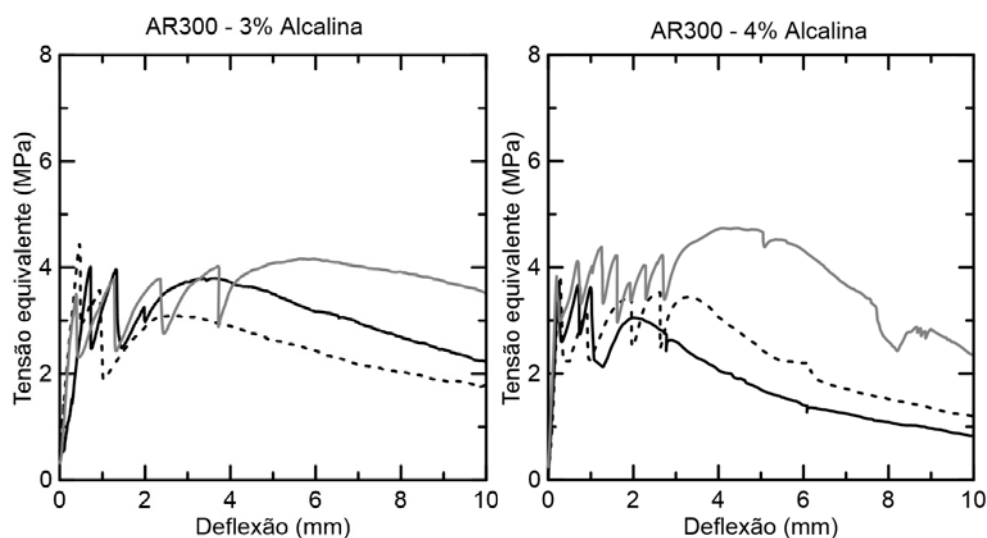


Figura 4.30: Curvas tensão-deflexão dos compósitos produzidos a partir da matriz AR300 com 3% e 4% de reforço com fibras.

Tabela 4.23: Resultados médios das propriedades em flexão dos compósitos da matriz AR300 reforçados com juta e desvio padrão.

Ensaio de flexão em 4 pontos	σ_f (MPa)	δ_f (mm)	σ_u (MPa)	δ_u (mm)	n° de fissuras
AR300 - 3% alcalina	3,97 (0,48)	0,36 (0,11)	3,64 (0,57)	3,94 (1,49)	2 - 4
AR300 - 4% alcalina	3,75 (0,05)	0,24 (0,04)	3,76 (0,28)	4,72 (3,53)	3 - 8

*Valor entre parênteses: desvio padrão.

Na Figura 4.31 mostra-se o processo de formação de fissuras na sequência das deflexões. Na Tabela 4.24 são apresentados os valores de densidade, espaçamento e abertura média das fissuras. A curva tensão-deformação-abertura de fissura é representada na Figura 4.32. Para o compósito reforçado com 3% de fibras é possível observar que o tamanho da abertura média da fissura aumentou de 40 para 180 μ m desde o momento de abertura da fissura até o momento da tensão máxima na região pós-fissuração.

Na Tabela 4.25 são apresentados os valores de densidade, espaçamento e abertura média das fissuras do compósito reforçado com 4% de fibras de juta. Na Figura 4.33 mostra-se o processo de formação de fissuras com o aumento das deflexões. A curva tensão-deformação-abertura de fissura desse compósito é apresentada na Figura 4.34. Para esse compósito é possível observar que o tamanho da abertura média da fissura aumentou de 60 para 180 μm desde o momento de abertura da fissura até o momento da tensão máxima na região pós-fissuração.

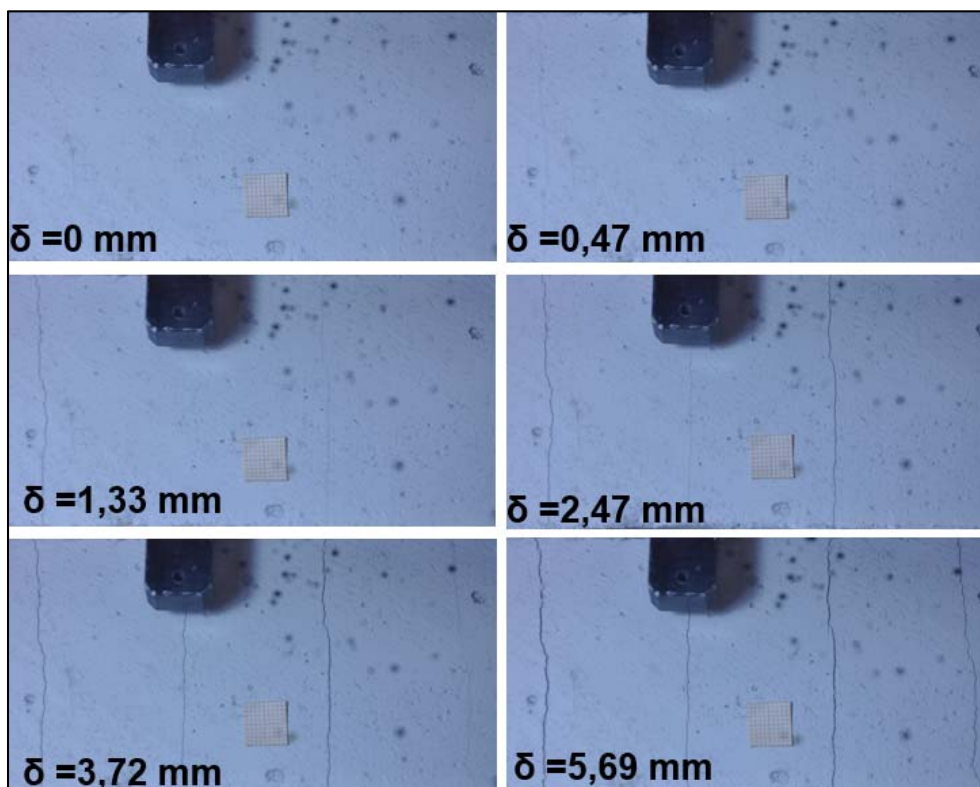


Figura 4.31: Abertura das fissuras na sequência das deflexões do compósito representativo do grupo de 3% de fibras na matriz AR300.

Tabela 4.24: Cálculo de espaçamento e abertura de fissuras do compósito representativo do grupo de 3% de fibras na matriz AR300.

Deflexão (mm)	Fissuras (f)	Densidade de fissura (f/mm)	Espaçamento (mm)	Abertura média das fissuras (μm)
0	0	0	100,00	0,00
0,42	1	0,01	50,00	45,78
1,33	2	0,02	33,33	75,02
2,47	3	0,03	25,00	101,09
3,72	4	0,04	20,00	118,00
5,69	4	0,04	20,00	184,40

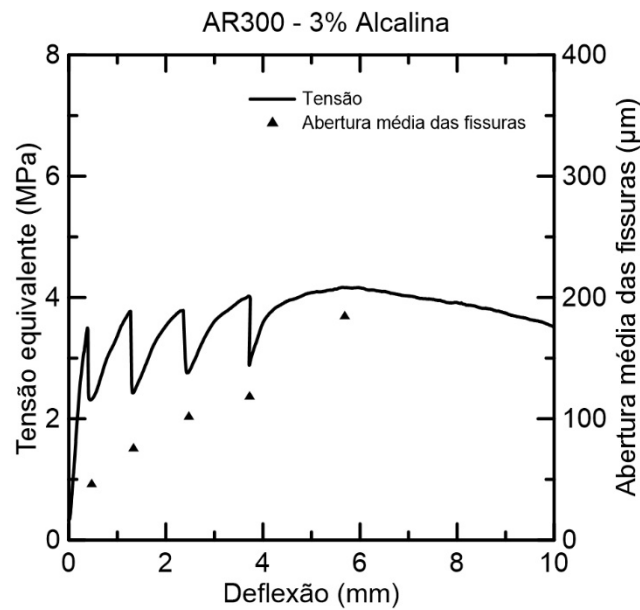


Figura 4.32: Curva tensão-deformação com os correspondentes valores de aberturas de fissuras do compósito representativo do grupo de 3% de fibras alcalinas na matriz AR300.

Tabela 4.25: Cálculo de espaçamento e abertura de fissuras do compósito representativo do grupo de 4% de fibras alcalinas na matriz AR300.

Deflexão (mm)	Fissuras (f)	Densidade de fissura (f/mm)	Espaçamento (mm)	Abertura média das fissuras (µm)
0	0	0,00	147,00	0,00
0,28	1	0,01	73,50	63,48
0,77	2	0,01	49,00	91,48
1,29	3	0,02	36,75	95,28
1,62	4	0,03	29,40	108,36
1,94	5	0,03	24,50	109,41
2,30	6	0,04	21,00	112,24
2,75	7	0,05	18,38	127,99
5,10	8	0,05	16,33	177,84
8,22	8	0,05	16,33	225,68

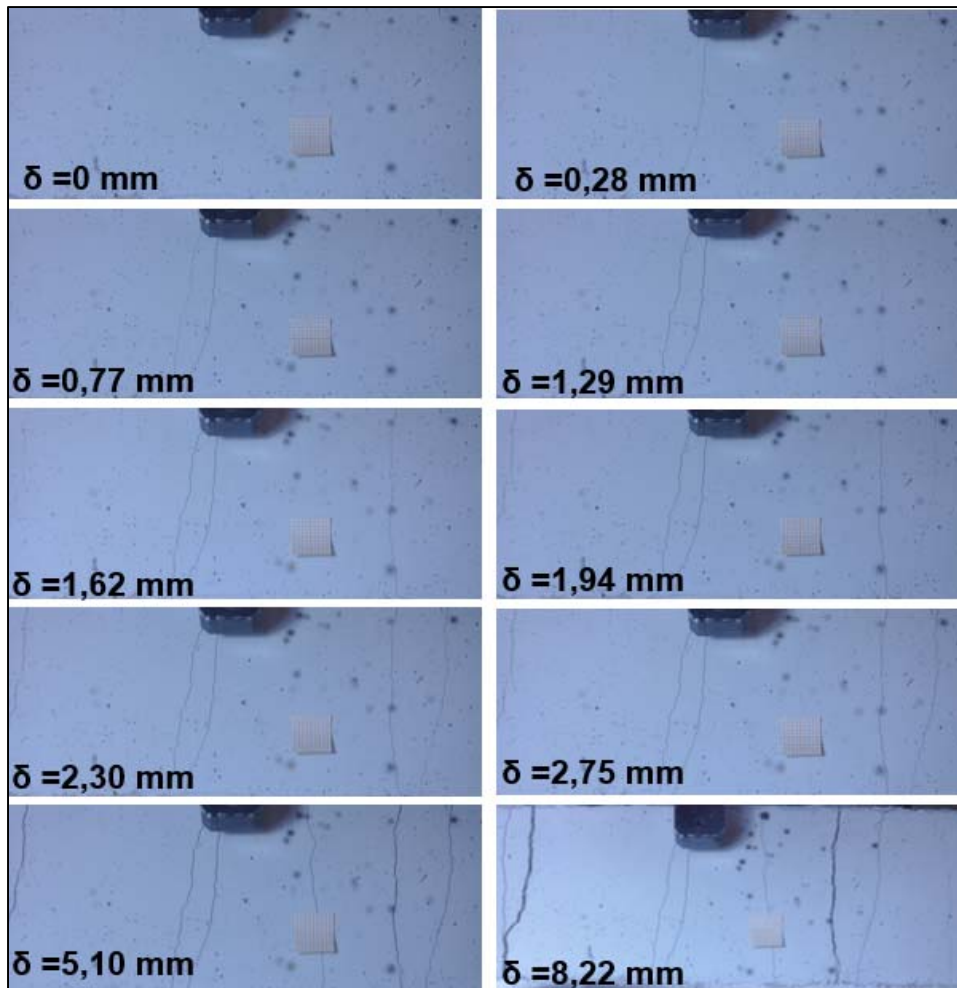


Figura 4.33: Abertura das fissuras na sequência das deflexões do compósito representativo do grupo de 4% de fibras alcalinas na matriz AR300.

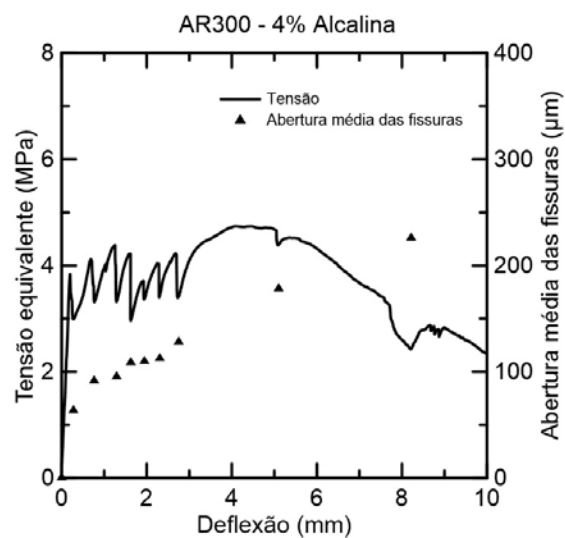


Figura 4.34: Curva tensão-deformação com os correspondentes valores de aberturas de fissuras do compósito representativo do grupo de 4% de fibras alcalinas na matriz AR300.

Os resultados obtidos indicam que o aumento do volume de fibras aumentou a número de fissuras reduzindo sua abertura e espaçamento durante o processo de fratura.

Matriz AR410 reforçada com fibras curtas de juta

As curvas tensão-deflexão dos compósitos produzidos com a matriz AR300 reforçada com 3 e 4% de fibras de juta tratadas em meio alcalino são apresentadas na Figura 4.35.

Na Tabela 4.26 apresenta-se os valores de tensão e deformação de primeira fissura, da máxima tensão pós-fissuração e respectiva deformação e do número de fissuras que ocorrem durante o ensaio.

Os resultados obtidos mostram valores de tensão de primeira fissura e de máxima tensão pós-fissuração da ordem de 5 e 4 MPa, respectivamente e que esses valores não variam expressivamente para os volumes de fibra utilizados. Neste caso não foi observada grande diferença relacionada ao controle do processo de fratura já que quando 4% de fibras de juta é utilizado o número de fissuras durante o processo de fratura permanece praticamente o mesmo.

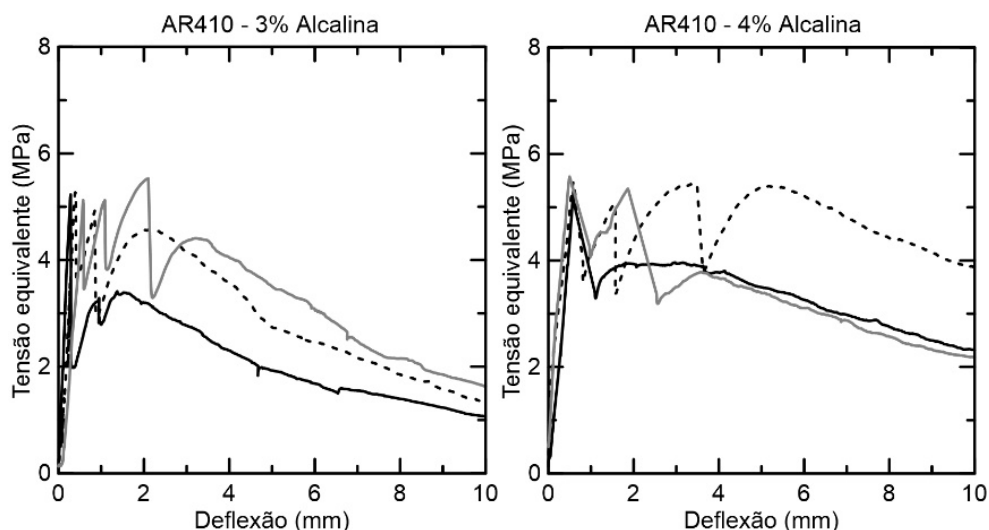


Figura 4.35: Curvas tensão-deflexão dos compósitos produzidos a partir da matriz AR410 com 3% e 4% de reforço com fibras.

Tabela 4.26: Resultados médios das propriedades em flexão dos compósitos da matriz AR410 reforçados com juta e desvio padrão.

Ensaio de flexão em 4 pontos	σ_f (MPa)	δ_f (mm)	σ_u (MPa)	δ_u (mm)	n° de fissuras
AR410 - 3% alcalina	5,17 (0,07)	0,42 (0,15)	4,11 (0,64)	2,33 (0,79)	2 - 3
AR410 - 4% alcalina	5,41 (0,09)	0,55 (0,06)	4,28 (0,87)	3,99 (1,15)	1 - 3

*Valor entre parênteses: desvio padrão.

O comportamento do compósito reforçado com 3% de fibras pode ser observado por meio da Tabela 4.28 e da Figura 4.36 e da Figura 4.37. Para esse compósito é possível observar que o tamanho da abertura média da fissura aumentou de 100 para 209 μ m desde o momento de abertura da fissura até o momento da tensão máxima na região pós-fissuração.

Tabela 4.27: Cálculo de espaçamento e abertura de fissuras do compósito representativo do grupo de 3% de fibras alcalinas na matriz AR410.

Deflexão	Fissuras	Densidade de fissura	Espaçamento	Abertura média das fissuras
(mm)	(f)	(f/mm)	(mm)	(μm)
0	0	0,00	100,00	0,00
0,57	1	0,01	50,00	101,30
1,08	2	0,02	33,33	132,29
2,10	3	0,03	25,00	146,04
3,20	3	0,03	25,00	208,95

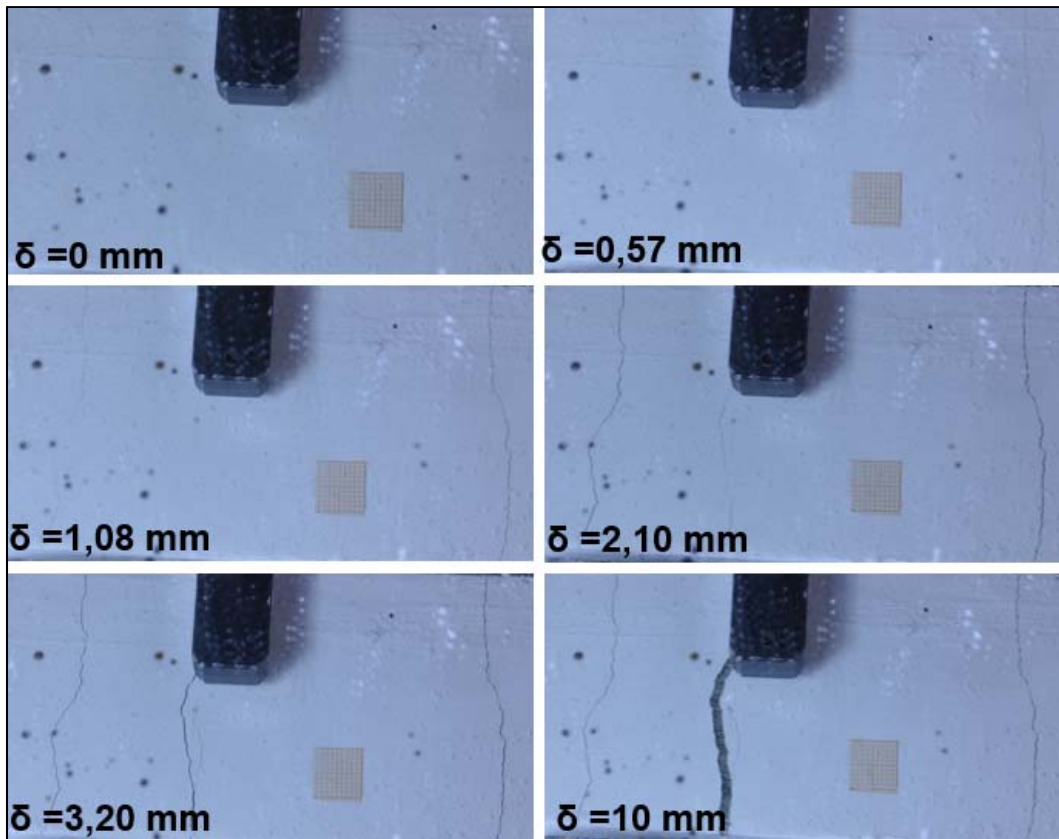


Figura 4.36: Abertura das fissuras na sequência das deflexões do compósito representativo do grupo de 3% de fibras alcalinas na matriz AR410.

Tabela 4.28: Cálculo de espaçamento e abertura de fissuras do compósito representativo do grupo de 3% de fibras alcalinas na matriz AR410.

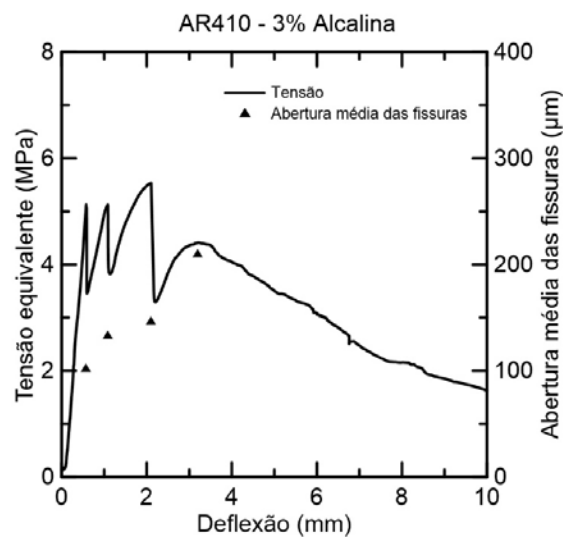


Figura 4.37: Curva tensão-deformação com os correspondentes valores de aberturas de fissuras do compósito representativo do grupo de 3% de fibras alcalinas na matriz AR410.

A representação da abertura das fissuras na sequência das deflexões para o compósito reforçado com 4% de fibras na matriz AR410, é mostrada na Figura 4.38.

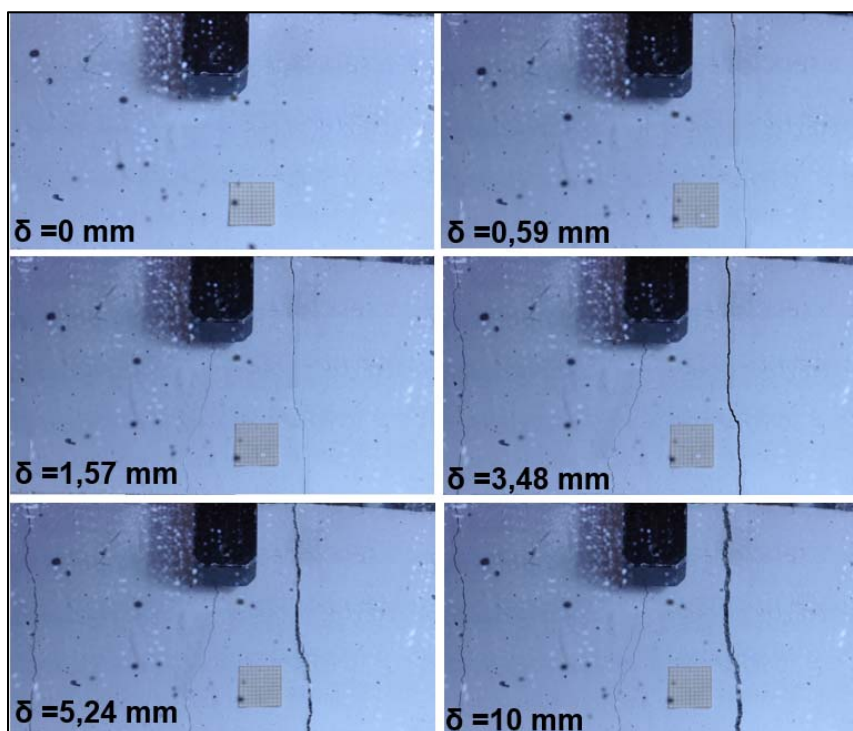


Figura 4.38: Abertura das fissuras na sequência das deflexões do compósito representativo do grupo de 4% de fibras na matriz AR410.

A Tabela 4.29 mostra os valores calculados de densidade, espaçamento e abertura média das fissuras, seguido da Figura 4.39 com ilustração da curva tensão-deflexão em função da abertura máxima de fissuras para esse material. Para esse compósito é possível observar que o tamanho da abertura média da fissura aumentou de 90 para 240 μ m desde o momento de abertura da fissura até o momento da tensão máxima na região pós-fissuração.

Tabela 4.29: Cálculo de espaçamento e abertura de fissuras do compósito representativo do grupo de 4% de fibras na matriz AR410.

Deflexão (mm)	Fissuras (f)	Densidade de fissura (f/mm)	Espaçamento (mm)	Abertura média das fissuras (μm)
0	0	0,00	100,00	0,00
0,59	1	0,01	50,00	87,29
1,57	2	0,02	33,33	91,02
3,48	3	0,03	25,00	152,66
5,24	3	0,03	25,00	238,45

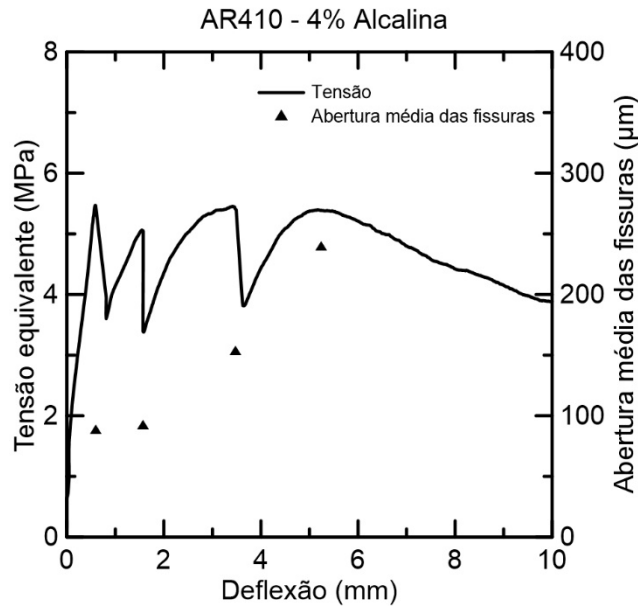


Figura 4.39: Curva tensão-deformação com os correspondentes valores de aberturas de fissuras do compósito representativo do grupo de 4% de fibras alcalinas na matriz AR410.

A partir dos resultados apresentados para a matriz AR410 é possível concluir que o incremento de fibras contribuiu com a capacidade de deformação do material, visto que a tensão máxima da região pós-fissuração ocorreu em uma deflexão de 5,24mm no compósito reforçado com 4% de fibras alcalinas, enquanto para o compósito de 3% de fibras essa deflexão foi de 3,20mm.

Comparando-se o comportamento, sob tração na flexão, dos compósitos produzidos a partir das matrizes AR300 e AR410, é possível observar que o desempenho dos materiais produzidos a partir da primeira matriz foi melhor comparado ao da segunda, visto que houve formação de maior número de fissuras e capacidade de deformação nos compósitos produzidos a partir da matriz AR300.

5 CONCLUSÕES

Neste trabalho foram desenhadas três matrizes com princípios *strain-hardening*, tendo como variável o tamanho máximo do grão de areia. Os resultados dos ensaios mecânicos realizados nas matrizes mostraram que para a matriz de maior tamanho máximo do grão, AR410, a tenacidade a fratura foi menor em relação às demais matrizes, além de sua resistência à tração ter sido menor e sua capacidade de deformação maior, o que pode favorecer a formação de múltiplas fissuras. Em relação ao comportamento à compressão, as matrizes não apresentaram grande variação nas tensões máximas e módulo de elasticidade.

Para as fibras de juta, com base nos resultados experimentais obtidos no estudo, o tratamento em solução alcalina foi escolhido, visto que esse tratamento modificou a superfície da fibra de forma a promover uma melhor interação fibra-matriz e se mostrou bastante eficiente na majoração do valor de tensão máxima friccional. Também foi possível concluir que quanto maior o DMC da areia, maiores foram os valores de tensão adesional e friccional para as fibras tratadas.

Os modelos desenvolvidos foram validados por meio de ensaios mecânicos de tração e flexão realizados nos compósitos, e demonstraram que matrizes com resistência de primeira fissura na tração com valores entre 2 e 1,5 MPa possuiriam potencial para apresentarem comportamento com endurecimento na tração direta se reforçadas com 4 e 3% de fibras, respectivamente. Ocorre que as matrizes desenvolvidas nesse trabalho apresentaram resistência à tração direta entre 2,5-3MPa o que impediu o adequado controle do processo de fratura, não ocorrendo o comportamento de endurecimento na tração direta. Deve-se ressaltar, no entanto que os teores de fibras utilizados permitiram a obtenção de tensões de tração pós-fissuração na ordem de grandeza dos valores que alimentaram o modelo, isto é, 1,5 e 2,0MPa.

A caracterização mecânica dos compósitos produzidos mostrou que o incremento de fibras contribuiu para o controle do processo de fratura e que maiores deformações últimas foram obtidas. Quando ensaiados na flexão os compósitos apresentaram um elevado número de fissuras e um completo controle do processo de fratura.

A partir dos resultados obtidos conclui-se que a aplicação do tratamento alcalino nas fibras de juta foi eficiente para melhoria da interface fibra-matriz e para a melhoria

do comportamento mecânico das fibras. O modelo micromecânico de dosagem se apresentou como uma ferramenta importante e precisa para o projeto de materiais compósitos com comportamento de endurecimento na tração direta

5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para as futuras pesquisas da linha de compósitos cimentícios reforçados com fibras curtas vegetais, as sugestões são:

- Redução da resistência das matrizes utilizadas no presente trabalho para 1,5-2,0MPa na tração direta e o subsequente ensaio dos compósitos desenvolvidos para verificação do comportamento de endurecimento na tração direta dessas novas formulações;
- Avaliar a durabilidade dos compósitos cimentícios reforçados com fibras de juta em condições de envelhecimento natural e acelerado;
- Avaliar a captura de dióxido de carbono (CO₂) em compósitos cimentícios reforçados com fibras vegetais através da carbonatação em câmara climatizada e determinar o impacto ambiental dos compósitos através do cálculo do carbono aprisionado nas misturas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARAÚJO, J., WALDMAN, W., & DE PAOLI, M. “Thermal propertie of high density polyethylene composites with natural fibres: coupling agent effect”, *Polymer Degradation and Stability*, Vol.93 93, N° 10, pp. 1770-1775, 2008.

ARBELAIZ A, FERNÁNDEZ B, RAMOS JA, MONDRAGON I. “Thermal and crystallization studies of short flax fibre reinforced polypropylene matrix composites: effect of treatments”, *Thermochimica Acta*. pp. 111–121, 2006.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 13276/2005 - Argamassa ‘para Assentamento e Revestimento de Paredes e Tetos – Preparo da mistura e determinação do índice de consistência. pp.3.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 8522 / 2008 Concreto - Determinação do módulo estático de elasticidade à compressão. pp.16.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5739/ 2007. Concreto - Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. pp.9.

ASTM.C1557 /2008 - Standard Test Method for Tensile Sntrength and Young's Modulus of Fibers. West Conshohocken, PA, USA: American Society for Testing and Materials.

AVESTON, J., KELLY, A. “Theory of multiple fracture of fibrous composites”, *Journal of Materials Science*, Vol. 8, N° 3, pp. 352-362, 1973.

AZWA, J., YOUSIF, B., MANALO, A., KARUNASENA, W. “A review on the degradability of polymeric composites based on natural fibres”, *Materials & Design*, Vol. 47, pp. 424-442, 2013.

BENTUR, A., MINDESS, S. *Fibre Reinforced Cementitious Composites*. Second Edition, New York, Taylor & Francis, 2007.

BRANDT, A. M. *Cement-Based Composites*. Second Edition, Materials, mechanical properties and performance. London and New York: Tylor & Francis, 2009.

D’ALMEIDA, A, R., TOLEDO FILHO, R., MELO FILHO, J. “Cement composites reinforced by short curaua fibers”, *Revista Matéria*, Vol. 15, N° 2, pp. 151–156, 2010.

DEFOIRDT, N., BISWAS, S., VRIESE, L., TRAN, L.Q.N., ACKER, J.V., AHSAN, Q., GORBATIKH, L. VUURE, A.V., VERPOEST, I. "Assessment of the tensile properties of coir, bamboo and jute fibre", *Composites: Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol. 41, Nº 5, pp. 588–595, 2010.

DITTENBER, D., GANGARAO, H. "Critical review of recent publications on use of natural composites in infrastructure", *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol. 43, Nº 8, pp. 1419-1429, 2012.

DE VEKEY, R. C., MAJUMDAR, A. J. "Determining bond strength in fibre reinforced composites", *Magazine of concrete research*, Vol. 20, Nº 65, pp. 229-234, 1968.

DWECK, J.; BÜCHLER, P.M.; CARTLEDGE, F.K., "The effect of different bentonites on cement hydration during solidification/stabilization of tannery wastes, *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, Vol.64, pp. 1011-1016, 2001.

ECC APLICATIONS. <http://www.umich.edu/~acemrl/NewFiles/eccapp.html>, 19:05 h 17/03/17

FERREIRA, S. R., *Effect Of Surface Treatments On The Structure, Mechanical, Durability And Bond Behavior Of Vegetable Fibers For Cementitious Composites*. Tese de D.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2016.

FERREIRA, S.R., *Influência da hornificação na aderência fibra-matriz e no comportamento de compósitos cimentícios reforçados com fibras curtas de sisal*. Dissertação de mestrado, Universidade Estadual de Feira de Santana, 2012.

FIDELIS, M.E.A., *Desenvolvimento e Caracterização Mecânica de Compósitos Cimentícios Têxteis Reforçados com Fibras de Juta*. Tese de D.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2014.

FIDELIS, M. E. A., PEREIRA, T. V. C. P., GOMES, O. F. M., SILVA, F. A. S., TOLEDO FILHO, R. D., "The effect of fiber morphology on the tensile strength of natural fibers", *Journal of Materials Research and Technology*. Vol.2, pp. 149-157. 2013.

FUKUYAMA, H. "Application of high performance fiber reinforced cementitious composites for damage mitigation of building structures - case study on damage mitigation of RC buildings with soft first story", *Journal of Advanced Concrete Technology*, Vol. 4, Nº 1, pp. 35-44, 2006.

GRABOIS, T. M, *Experimental Fracture Mechanics of Cement Based Materials: A New Methodology for the Accurate Measurement of Material Toughness*. Tese de D.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2016.

JACOBSEN, S., WYMAN, C. "Cellulose and Hemicellulose Hydrolysis Models for Application to Current and Novel Pretreatment Processes", *Applied Biochemistry and Biotechnology*, Vol. 84, N° 1-9, pp. 84-86, 2000.

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

JOHN, M., THOMAS, S. "Biofibers and biocomposites", *Carbohydrate Polymers*, Vol. 71, N°3, pp. 343-364, 2008.

Kanda, T. *Design of Engineered Cementitious Composites for Ductile Seismic Resistant Elements*.. Tese de D.Sc., University of Michigan.1998.

KASPARKIEWICZ, J., "discussion", in: Proceedings of RILEM Symposium on Testing and Test Methods of Fiber Cement Composites, Edited by N. Swamy, The Construction Press, England, pp. 493–495, 1978.

KRENCHER, H., *Fibre reinforcement; theoretical and practical investigations of the elasticity and strength of fibre-reinforced materials*. Ph.D. Thesis, DTU Denmark, Copenhagen, Denmark, 1964.

KUNIEDA, M., INAKUMA, H., MASUKAWA, J., & ROKUGO, K. "Basic study on surface overlay with ECC". *Proceedings of the Concrete Structure Scenarios*. pp. 65-270, 2004.

LEPECH, M.D., LI, V.C. "Water permeability of engineered cementitious composites", *Cement and Concrete Composites*, Vol. 31, N° 10, 744–753, 2009.

LEUNG, C. K. Y., LI, V. C. "New strength-based model for the debonding of discontinuous fibres in an elastic matrix", *Journal of Materials Science*, Vol. 26, N° 22, pp. 5996–6010, 1991.

LI, V. C. "Postcrack scaling relations for fiber reinforced cementitious composites", *Journal of materials in civil engineering*, Vol. 4, N° 1, pp. 41–57, 1992.

LI, V. C. "On Engineered Cementitious Composites (ECC) A review of the material and its applications", *Journal of Advanced Concrete Technology*, Vol. 1, Nº 3, pp. 215-230, 2003.

LI, V. C., LEUNG, C. K. Y "Steady-State and Multiple Cracking of Short Random Fiber Composites." *Journal of Engineering Mechanics*. 1992.

LIMA, P. R. L., *Análise teórica e experimental de compósitos reforçados com fibras de sisal*, Tese de D.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2004.

LIN, Z., T. KANDA, AND VICTOR C. LI, "On Interface Property Characterization and Performance of Fiber Reinforced Cementitious Composites", *Concrete Science and Engineering* , Vol.1, pp. 173–84, 1999.

MAGALHÃES, M. S., *Caracterização Experimental de Compositos Cimentícios reforçados com fibras de PVA: Processo de fratura, propriedades térmicas, deformações diferidas e estabilidade térmica*. Tese de D.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2010.

MAJUMDAR, A. J. "Glass fibre reinforced cement and gypsum composites", *Proceedings of the Royal Society of London A*, Vol. 319, Nº 1536, pp. 69-78, 1970.

MARSHALL, D. B., AND B. N. COX. "A J-Integral Method for Calculating Steady-State Matrix Cracking Stresses in Composites." *Mechanics of Materials*. Vol.7, Nº 2, pp.127–33, 1988.

MELO FILHO, J. A., *Durabilidade Química e Térmica e Comportamento Mecânico de Compósitos de Alto Desempenho Reforçados com Fibras de Sisal*. Tese de D.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2012.

NAAMAN, A. E., MOAVENZADEH, F., MCGARRY, F. J. "Probabilistic Analysis of Fiber Reinforced Concrete," *Journal of the Engineering Mechanics Division, ASCE*, Vol. 100, Nº. EM2, pp. 397–413, 1974.

NAAMAN, A. E., REINHARDT, H. W. "Proposed Classification of FRC Composites Based on their Tensile Response", *Materials and Structures*, Vol. 39, Nº 5, pp. 547–555, 2006.

NALLTHAMBI, P., KARIHALOO, B., HEATON, B. "Effect of Specimen and Crack Sizes, Water/Cement Ratio and Coarse Aggregate Texture upon Fracture Toughness of Concrete", *Magazine of Concrete Research*, Vol. 36, N° 129, pp. 227-236, 1984.

OLIVEIRA, A. M., *Fluência a altas temperaturas, aderência fibra matriz e comportamento mecânico sob ações higrotérmicas de compósitos cimentícios reforçados com fibras de PVA*. Tese de D.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2015.

PANDEY, J. K., AHN, S. H., LEE, C. S., MOHANTY, A. K., MISRA, M. "Recent Advances in the Application of Natural Fiber Based Composites", *Macromolecular Materials in Engineering*, Vol. 295, N° 11, pp. 41–57, 2010.

RAHMAN, S. "Jute - A Versatile Natural Fibre: Cultivation, Extraction and Processing", *Industrial Applications of Natural Fibres: Structure, Properties and Technical Applications*. Wiley Series in Renewable Resources. Edited by JÖRG MÜSSIG. 1 ed., 2010.

ROKUGO, K., KUNIEDA, M., MIYAZATO, S. "Structural Applications of HPFRCC in Japan". Measuring, monitoring and modeling concrete properties. In: KONSTAGDOUTOS, M.S. (ed.) Springer. pp. 17-23, 2006.

ROMUALDI, J. P., MANDEL, J. A. "Tensile Strength of Concrete Affected by Uniformly Distributed Closely Spaced Short Length of Wire Reinforcement", *ACI Proceedings Journal*, Vol. 61, N° 6, pp. 657-672, 1964.

SAHA, P., MANNA, S., CHOWDHURY, S., SEN, R., ROY, D., & ADHIKARI, B. "Enhancement of tensile strength of lignocellulosic jute fibers by alkali-steam treatment", *Bioresource Technology*, Vol. 101, pp. 3182-3187, 2010.

SIERRA-BELTRAN, M.G. "Ductile Cement-Based Composites with Wood Fibres - Material Design and Experimental Approach." *Haveka*. 2011.

SILVA, F. A., CHAWLA, N., TOLEDO FILHO, R. D. "Tensile behavior of High Performance (sisal) Fibers". *Composites Science and Technology*., Vol. 68, N°15-16, pp. 3438-3443, 2008.

SILVA, C. D., FREIRE JÚNIOR, R. C. S., AQUINO, E. M. F. “Influência da presença de fibras naturais em compósitos híbridos, tipo sanduíche”. Congresso Nacional de Engenharia Mecânica (CONEM), Belém, pp. 1-10, 2004.

SILVA, F. A.; MOBASHER, B.; SORANAKOM, C.; TOLEDO FILHO, R. D. “Effect of fiber shape and morphology on interfacial bond and cracking behaviors of sisal fiber cement based composites”, *Cement and Concrete Composites*, Vol. 33, Nº. 8, p. 814-823, 2011.

SNOECK, D., SMETRYNS, P. A., DE BELIE, N. “Improved multiple cracking and autogenous healing in cementitious materials by means of chemically-treated natural fibres”, *Biosystems Engineering*, Vol. 139, Nº 1998, pp. 87–99, 2015.

SOLTAN, D. G., DAS NEVES, P., OLVERA, A., SAVASTANO, H., LI, V. C. “Introducing a curauá fiber reinforced cement-based composite with strain-hardening behavior”. *Industrial Crops and Products*, Vol. 103, pp. 1–12, 2017.

SPINACÉ M. A. S., FERMOSELLI, K. K. G., DE PAOLI, M. A. “Recycled polypropylene reinforced with curaua fibers by extrusion”, *Journal of Applied Polymer Science*, Vol. 112, Nº6, pp. 3686-3694, 2009.

SWAMY, R. *Natural Fibre Reinforced Cement and Concrete*. First Edition, London, Blackie, 1988.

TOLEDO FILHO, R. D., *Materiais compósitos reforçados com fibras naturais: caracterização experimental*. Tese de D.Sc., PUC-Rio, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 1997.

TOLEDO FILHO, R. D., SCRIVENER, S., ENGLAND, G. L., GHAVAMI, K. “Durability of alkali-sensitive sisal and conconut fibres in cement mortar composites”, *Cement & Concrete Composites*, Vol. 22, Nº2, pp.127-143, 2000.

VASUDEVAN, VANGAL, A., GRABOIS, T. M., TOLEDO FILHO, R. D., AND CORDEIRO, L. P., CHAGAS, G., “A New Fracture Test Methodology for the Accurate Characterization of Brittle Fracture Properties”. pp.1–12, 2017.

WANG, S., LI, V. C., "Engineered Cementitious Composites with High-volume Fly Ash", *ACI Materials Journal*, Vol. 104, Nº. 3, pp. 233-241, 2007.

WANG, S., LI, V. C. Lightweight Engineered Cementitious Composites (ECC) em High Performance Fiber Reinforced Cement Composites. Workshop Ann Arbor, USA. pp. 379-390, 2003.

WEI, J., MEYER, C., "Utilization of rice husk ash in green natural fiber-reinforced cement composites: Mitigating degradation of sisal fiber". *Cement and Concrete Research*.Vol.81, pp.94-111, 2015.

WONG, K., YOUSIF, B., LOW, K. "The effects of alkali treatment on the interfacial adhesion of bamboo fibres", *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part L: Journal of Materials:Design and Applications*, Vol. 224, N°3, pp. 139-148, 2010.

YANG, E. H., YANG, Y., LI, V. C. "Use of High Volumes of Fly Ash to Improve ECC Mechanical Properties and Material Greenness", *ACI Materials Journal*, pp. 303–311, 2007.

YANG, E. H., YANG, Y., LI, V. C. "A Micromechanical Model for Fiber Cement Optimizaiton and Component Tailoring," N°. 1992, pp.1–13. 2006.

YOUNG, J., MINDNESS, S., GRAY, R., BENTUR, A. *The science and technology of civil engineering materials*. Saddle. New Jersey, Prentice Hall, 1998.

ZUKOWSKI, B., *Design and Characterization of Strain Hardening Curauá Fiber Cement-Based Composites*. Tese de D.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2017.