

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA

CAMILA VARGAS CARDOSO

**ESTUDO DA UTILIZAÇÃO DE TRATAMENTO POLIMÉRICO COM SÍLICA DE
CASCA DE ARROZ NO COMPORTAMENTO À TRAÇÃO DIRETA E ADERÊNCIA
DA FIBRA DE SISAL EM COMPÓSITOS CIMENTÍCIOS**

**Alegrete, RS
2017**

CAMILA VARGAS CARDOSO

**ESTUDO DA UTILIZAÇÃO DE TRATAMENTO POLIMÉRICO COM SÍLICA DE
CASCA DE ARROZ NO COMPORTAMENTO À TRAÇÃO DIRETA E ADERÊNCIA
DA FIBRA DE SISAL EM COMPÓSITOS CIMENTÍCIOS**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Curso de Engenharia Civil
da Universidade Federal do Pampa, como
requisito parcial para obtenção do Título
de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Dr. Ederli Marangon

**Alegrete, RS
2017**

CAMILA VARGAS CARDOSO

ESTUDO DA UTILIZAÇÃO DE TRATAMENTO POLIMÉRICO COM SÍLICA DE CASCA DE ARROZ NO COMPORTAMENTO À TRAÇÃO DIRETA E ADERÊNCIA DA FIBRA DE SISAL EM COMPÓSITOS CIMENTÍCIOS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Civil.

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado em: 28/11/2017

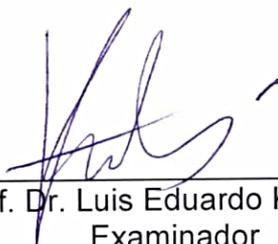
Banca examinadora:



Prof. Dr. Ederli Marangon
Orientador
UNIPAMPA



Profa. Dra. Ana Paula Garcia
Examinador
UNIPAMPA



Prof. Dr. Luis Eduardo Kostas
Examinador
UNIPAMPA

Dedico este trabalho à minha família, em especial aos meus avós Delmiro e Eva (*in memoriam*), pelos ensinamentos e exemplos a mim transmitidos, impulsionando-me sempre a seguir em direção aos meus objetivos.

AGRADECIMENTOS

A Deus, que jamais me desamparou e sempre me abençoou dando-me força, ânimo e fé para trilhar essa caminhada.

Aos meus avós Delmiro e Eva (*in memoriam*) por terem sido meus maiores exemplos, pelo amor, carinho e dedicação incessante enquanto estiveram comigo. A saudade é tamanha, mas o sentimento de gratidão por terem ajudado a construir grande parte do que sou hoje é ainda maior. Essa conquista é dedicada a vocês.

À minha família pelo apoio durante todo o período de graduação, em especial aos meus pais Luis e Neida e a minha segunda mãe Jurema, pelas diversas formas com a qual sempre me ajudaram, incentivando-me incondicionalmente a seguir meus sonhos, enfrentando e superando cada dificuldade ao meu lado.

Ao meu namorado Marlon, pelo companheirismo, amor, dedicação e paciência ao aguentar meus desesperos, por ter sido meu ombro amigo e ponto de paz quando tudo parecia desmoronar.

Aos amigos e colegas conquistados na graduação, pessoas imprescindíveis nessa jornada, companheiros de dias e noites de estudo, pelos momentos de ajuda mútua e pela contribuição que cada um teve ao longo dessa caminhada. Em especial a Natália, Matthews, Felipe e Francisco que sempre estiveram ao meu lado tanto para os estudos quanto para dividir os bons e maus momentos. A Gabriella pela amizade e companheirismo desde o início dessa caminhada. E também a Emanuele pelo apoio, companheirismo e amizade nesses últimos meses.

Aos amigos de longe que sempre se fizeram presentes através de mensagens e ligações apoiando-me a seguir em frente.

Ao meu orientador professor Ederli pela orientação e ensinamentos passados, agregando profissional e pessoalmente a minha trajetória, onde a cada conversa sempre aprendo e me interesso ainda mais pela área de pesquisa.

À professora Ana Paula e professor Luis Kostas, membros da banca, pelas valiosas contribuições para aperfeiçoamento deste trabalho.

Aos técnicos dos laboratórios de engenharia civil, de engenharia mecânica e de química por sempre estarem dispostos a ajudar no que fosse necessário.

Aos demais professores e colegas do curso que compartilharam de seu conhecimento, agregando a minha formação.

“Que os vossos esforços desafiem as impossibilidades, lembrai-vos de que as grandes coisas do homem foram conquistadas do que parecia impossível.”

Charles Chaplin

RESUMO

Devido à evolução dos materiais cimentícios, a incorporação de tecnologias inovadoras torna-se de caráter primordial quando se faz referência a processos construtivos. Tendo em vista que os materiais a base de cimento apresentam muitas vantagens, no entanto, possuem restrições quando solicitados por esforços de tração, exibindo comportamento frágil e baixa tenacidade, a opção pelo uso de fibras vegetais como reforço é considerada benéfica em decorrência que estas demandam menor quantidade de energia para extração e tendem a melhorar as propriedades mecânicas do compósito. No entanto, modificar as características das fibras naturais através da aplicação de algum tipo de tratamento pode proporcionar um acréscimo à resistência mecânica e incrementar a capacidade de ancoragem fibra-matriz. Desse modo, buscando a incorporação de materiais naturais e renováveis, a fim de propiciar melhores propriedades mecânicas aos compósitos cimentícios, este trabalho visa realizar a aplicação de tratamento utilizando poliestireno expandido e Sílica de Casca de Arroz em fibras de sisal de forma a avaliar a capacidade de absorção e análise da microestrutura da superfície da fibra de sisal, verificando a eficácia do tratamento na uniformização longitudinal das fibras. Este estudo ainda analisa o efeito do tratamento polimérico com Sílica de Casca de Arroz na resistência à tração direta das fibras de sisal naturais e tratadas com comprimento de fibra de 50 mm, como também sua influência na capacidade de aderência fibra-matriz através de ensaios de arrancamento utilizando comprimento de embebimento de fibra de 50 mm para as idades de controle de 7 e 28 dias. Na análise dos resultados notou-se que o tratamento proposto reduziu o índice de absorção de água das fibras de sisal, ocasionando maior homogeneidade nos dados obtidos para resistência à tração direta, porém, não proporcionou alterações significativas à força de ruptura das fibras. Para a análise de microestrutura observa-se que ocorreu a selagem da fibra através do tratamento, ocorrendo também pontos de aglutinação ao longo da mesma. Quanto ao comportamento de aderência constatou-se que o tratamento proposto prejudicou a interação fibra-matriz para ambas as idades de controle analisadas.

Palavras-Chave: fibra de sisal; poliestireno expandido; sílica de casca de arroz; tração direta; arrancamento.

ABSTRACT

Due to the evolution of cementitious materials, the incorporation of innovative technologies becomes of paramount importance when it comes to constructive processes. Considering that cement-based materials have many advantages, however, they have restrictions when they are requested by tensile stresses, exhibiting fragile behavior and low tenacity, the option to use vegetable fibers as reinforcement is considered beneficial, as they demand less energy for extraction and tend to improve the mechanical properties of the composite. However, to modify the characteristics of natural fibers through the application of some type of treatment can provide an increase in mechanical strength and increase the fiber-matrix anchoring capacity. In this way, seeking the incorporation of natural and renewable materials, in order to provide better mechanical properties to the cementitious composites, this work aims to perform the application of treatment using expanded polystyrene and Rice Husk Silica in sisal fibers in order to evaluate the absorption capacity and analysis of the surface microstructure of the sisal fiber, verifying the effectiveness of the treatment in the longitudinal uniformization of fibers. This study also analyzes the effect of the polymer treatment with Rice Husk Silica on the direct tensile strength of natural and treated sisal fibers with 50 mm fiber length, as well as their influence on the fiber-matrix adhesion capacity through pullout tests using length of embedment of 50 mm fiber for the control ages of 7 and 28 days. In the analysis of the results it was observed that the proposed treatment reduced the water absorption index of the sisal fibers, causing greater homogeneity in the data obtained for tensile strength, but did not provide significant alterations to the strength of fiber rupture. For the analysis of microstructure it is observed that the sealing of the fiber occurred through the treatment, also occurring points of agglutination along the same. Regarding the adherence behavior, it was observed that the proposed treatment impaired the fiber-matrix interaction for both control ages analyzed.

Keywords: sisal fiber; expanded polystyrene; rice husk silica; tensile test; pullout.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Esquema de orientação molecular uma microfibrila celulósica	19
Figura 2 – Imagens de MEV das fibras de coco, curauá, juta, piaçava e sisal.....	19
Figura 3 – Curva tensão x deformação de fibras de côco com diferentes diâmetros para velocidade 5 mm/min e distância entre as garras de 20 mm	20
Figura 4 – Curva tensão x deformação de fibras de curauá com diferentes diâmetros para velocidade 5 mm/min e distância entre as garras de 20 mm	20
Figura 5 – (a) planta de sisal e (b) fibras de sisal após beneficiamento	22
Figura 6 – Desenho esquemático mostrando as diferentes camadas de uma célula individual de fibra de sisal	22
Figura 7 – Imagens de MEV da: (a) seção transversal e (b) superfície da fibra de sisal	23
Figura 8 – Curva carga x deslizamento para comprimento de embeбimento de 25 mm	25
Figura 9 – Curva carga x deslizamento para comprimento de embeбimento de 50 mm	25
Figura 10 – (a) detalhe do rompimento da fibra não tratada no exterior do corpo de prova durante o ensaio de arrancamento e (b) detalhe da ruptura ao longo do corpo de prova da fibra tratada durante o ensaio de arrancamento.....	26
Figura 11 – Imagens de MEV da interface fibra-matriz após teste de arrancamento com fibras de sisal tratadas: (a) tratamento híbrido e (b) tratamento com polímero .	27
Figura 12 – Superfície da fibra de coco: (a) fibra não tratada e (b) fibra tratada com álcali	29
Figura 13 – Arrancamento da fibra de coco da matriz de cimento: (a) sinais e (b) resíduos de superfície da fibra de coco.....	29
Figura 14 – Imagens de MEV do arrancamento das fibras de coco em meio a matriz cimentícia: (a) não tratada e (b) tratada com álcali	30
Figura 15 – Mecanismos de degradação da fibra de sisal em ambiente cimentício..	32
Figura 16 – Curvas idealizadas para (a) carga x deslocamento e (b) tensão x deslocamento	34
Figura 17 – Diferentes morfologias da fibra de sisal: (a) ferradura, (b) arco e (c) arco retorcido	35
Figura 18 – Fluxograma simplificado do programa experimental.....	36
Figura 19 – Material aglomerante e adições minerais utilizadas: (a) cimento Portland CP V-ARI; (b) cinza volante e (c) metacaulim	37
Figura 20 – Agregado miúdo utilizado (areia).....	38
Figura 21 – Material utilizado para promover o tratamento nas fibras de sisal: Sílica de Casca de Arroz.....	39
Figura 22 – Fibras de sisal	39

Figura 23 – Aditivo superplastificante.....	40
Figura 24 – (a) EPS e (b) Toluol P. A. (Tolueno).....	41
Figura 25 – Equipamento para banho ultrassônico	41
Figura 26 – (a) sistema para dissolução do polímero em solvente por meio de banho ultrassônico e (b) ampliação.....	42
Figura 27 – Solução polimérica utilizando EPS com adição de SCA	42
Figura 28 – (a) procedimento de aplicação do tratamento polimérico com EPS e adição de SCA e (b) fibras de sisal após o tratamento	43
Figura 29 – Microscópio óptico utilizado para análise microestrutural	44
Figura 30 – Máquina de ensaios mecânicos Shimadzu AGS-X	45
Figura 31 – Molde utilizado para realização do ensaio de tração direta.....	46
Figura 32 – Configuração do ensaio de tração direta na fibra de sisal tratada	46
Figura 33 – Misturador mecânico do tipo planetário.....	47
Figura 34 – Etapas do ensaio de consistência: (a) preenchimento do tronco cônico; (b) retirada da fôrma verticalmente e (c) verificação da medida do espalhamento ...	48
Figura 35 – Placa em MDF para encaixe dos tubos de PVC	49
Figura 36 – Desenho esquemático mostrando o alinhamento da fibra	49
Figura 37 – Procedimento de moldagem dos corpos de prova para ensaio de arrancamento	50
Figura 38 – Encaixe superior das placas de MDF nos moldes de PVC	50
Figura 39 – Corpos de prova com embebedimento de 50 mm de fibra.....	51
Figura 40 – Configuração do ensaio de arrancamento para corpo de prova com 50 mm de embebedimento.....	52
Figura 41 – Imagens de microscopia óptica da superfície de fibra de sisal não tratada: (a) ampliação 100x e (b) ampliação 200x	54
Figura 42 – Imagens de microscopia óptica da superfície de fibra de sisal tratada quimicamente com EPS e SCA: (a) ampliação 100x e (b) ampliação 200x	54
Figura 43 – Curvas Força x Deslocamento para ATD-ST	57
Figura 44 – Curvas Força x Deslocamento para ATD-PSCA.....	57
Figura 45 – Curvas Força x Deslocamento para ensaio de arrancamento em CPA-ST aos 7 dias.....	62
Figura 46 – Curvas Força x Deslocamento para ensaio de arrancamento em CPA-PSCA aos 7 dias	62
Figura 47 – Curvas Força x Deslocamento para ensaio de arrancamento em CPA-ST aos 28 dias.....	63
Figura 48 – Curvas Força x Deslocamento para ensaio de arrancamento em CPA-PSCA aos 28 dias	64

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Caracterização do agregado miúdo (areia)	38
Tabela 2 – Quantidade de materiais para promover o tratamento nas fibras de sisal	40
Tabela 3 – Consumo dos materiais utilizados na dosagem da matriz de cimento	47
Tabela 4 – Ensaio de tração direta para ATD-ST e ATD-PSCA.....	55
Tabela 5 – Deslocamentos e forças médios de ruptura para ATD-ST e ATD-PSCA	56
Tabela 6 – Valor médio, mínimo e máximo, desvio padrão e coeficiente de variação da carga de ruptura, deslocamento para CPA-ST e CPA-PSCA com 50 mm de embebimento de fibra na idade de 7 dias	59
Tabela 7 – Valor médio, mínimo e máximo, desvio padrão e coeficiente de variação da carga de ruptura, deslocamento para CPA-ST e CPA-PSCA com 50 mm de embebimento de fibra na idade de 28 dias	59
Tabela 8 – Valor médio, desvio padrão e coeficiente de variação da carga de ruptura e deslocamento para CPA-ST (CP 2, CP 4, CP 8 e CP 10) e CPA-PSCA (CP 2, CP 5, CP 6 e CP 10) com 50 mm de embebimento de fibra aos 7 dias.....	60
Tabela 9 - Valor médio, desvio padrão e coeficiente de variação da carga de ruptura e deslocamento para CPA-ST (CP 2, CP 4, CP 8 e CP 10) e CPA-PSCA (CP 2, CP 5, CP 8 e CP 9) com 50 mm de embebimento de fibra aos 28 dias.....	61

LISTA DE ABREVIATURAS

ATD-ST – amostras para ensaio de tração direta, fibra de sisal sem tratamento

ATD-PSCA – amostras para ensaio de tração direta, fibra de sisal submetida ao tratamento polimérico com SCA

CP – cimento Portland CP V-ARI;

CPA-PSCA – corpos de prova para ensaio de arrancamento, compósito reforçado com fibra de sisal submetida ao tratamento polimérico com SCA

CPA-ST – corpos de prova de referência para ensaio de arrancamento, compósito reforçado com fibra de sisal sem tratamento

CV – cinza volante

EPS – poliestireno expandido

MC – metacaulim

SCA – Sílica de Casca de Arroz

SP – aditivo superplastificante

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	Objetivos.....	17
1.1.1	Objetivo geral.....	17
1.1.2	Objetivos específicos.....	17
2.	CONCEITOS GERAIS E REVISÃO DE LITERATURA	18
2.1	Fibras naturais	18
2.1.1	Fibra de sisal.....	21
2.2	Influência de tratamentos superficiais no comportamento mecânico das fibras	24
2.3	Compósitos reforçados com fibras.....	31
2.4	Interface de aderência fibra-matriz.....	33
3.	METODOLOGIA	36
3.1	Materiais utilizados	37
3.1.1	Cimento Portland e adições minerais.....	37
3.1.2	Agregado miúdo	38
3.1.2	Sílica de Casca de Arroz.....	38
3.1.3	Fibras de sisal.....	39
3.1.4	Aditivo superplastificante.....	39
3.2	Tratamentos superficiais nas fibras.....	40
3.3	Avaliação da capacidade de absorção das fibras.....	43
3.4	Análise da microestrutura	44
3.5	Ensaio de tração direta nas fibras.....	44
3.6	Matriz cimentícia	46
3.6.1	Produção da matriz	47
3.7	Moldagem dos compósitos	48
3.8	Ensaio de arrancamento.....	50

4. ANÁLISE DOS RESULTADOS	53
4.1 Avaliação da capacidade de absorção das fibras	53
4.2 Análise microestrutural	54
4.3 Tração direta das fibras	55
4.4 Ensaio de arrancamento	58
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS	65
REFERÊNCIAS.....	68

1 INTRODUÇÃO

Com a constante evolução dos materiais a base de cimento, desde o início do século XIX até os dias atuais, é possível perceber que a necessidade de escolher um material adequado torna-se de caráter primordial quando se faz referência a processos construtivos.

Desse modo, a incorporação de tecnologias inovadoras, que propõem o uso de novos materiais, tais como, aditivos químicos, adições minerais e as fibras, sejam elas sintéticas ou naturais, na fabricação dos compósitos cimentícios, buscam aprimorar suas características quanto à trabalhabilidade, resistência mecânica, além de acrescentar a este um melhor custo-benefício e preservação ambiental.

Sabendo-se que o concreto é considerado um material que apresenta muitas vantagens, no entanto, possui restrições quando sujeito a esforços de tração, exibindo comportamento frágil e baixa tenacidade, a opção pela utilização de fibras vegetais como reforço é considerada benéfica em diversos aspectos. Dentre estes, têm-se como foco principal o crescimento da necessidade de minimizar o uso de materiais potencialmente agressivos, modificando a concepção rotineira da utilização de fibras sintéticas ou metálicas.

Dessa forma, em decorrência do fato das fibras naturais serem biodegradáveis e demandarem menor quantidade de energia para extração, há um interesse intensivo sobre o seu potencial ecológico agregado para utilização na composição de reforços cimentícios. Diante disso, ressalta-se que a inclusão de fibras naturais pode conferir ao compósito aumento na resistência à tração, flexão, abrasão, impacto e fadiga, atribuindo a este maior capacidade de absorção de energia antes da ruptura e retardando assim, aparecimento de fissuras. A inclusão de fibras naturais atua também aumentando a ductilidade do compósito através do vínculo de aderência criado na interface fibra-matriz (BENTUR; MINDESS, 2007).

A utilização de compósitos cimentícios reforçados com fibras naturais é abrangente, uma vez que esses compósitos podem ser empregados em divisórias internas e externas, painéis estruturais, reforço de paredes de alvenaria. Dentre as fibras naturais mais usadas como reforço em meio a matriz cimentícia estão: juta, bambu, algodão, sisal, bagaço de cana de açúcar, curauá e coco.

A fibra de sisal, em relação às fibras vegetais, tem sido uma das opções mais utilizadas no desenvolvimento de compósitos cimentícios, em razão da sua

excelente resistência à tração, trabalhando como um complemento à básica deficiência conhecida dos materiais a base de cimento.

Por outro lado, um dos grandes paradigmas do uso das fibras vegetais, está relacionado à sua degradabilidade quando expostas ao ambiente alcalino formado em seu envoltório, ao serem utilizadas para reforçar as matrizes de cimento. Com base nisso, estudam-se formas plausíveis de diminuir a degradação das fibras naturais através de tratamentos de proteção à fibra, através da impermeabilização da matriz, da redução da alcalinidade no meio de inserção e do teor de hidróxido de cálcio livre presente na matriz.

Assim, segundo Gram (1983), o primeiro mecanismo de degradação da fibra de sisal relaciona-se com a deposição química da lignina e da hemicelulose na lamela central da fibra, fazendo com que a água alcalina presente nos poros do concreto as dissolva, sequenciando a quebra da ligação entre as fibrocélulas. O segundo processo ocorre quando há mineralização da fibra, a qual é decorrente da deposição de hidróxido de cálcio em suas paredes celulares (TOLEDO FILHO, 1997).

Diante desta contrariedade, vários autores buscaram desenvolver matrizes livres ou com teor reduzido de hidróxido de cálcio, com propósito de minimizar a deterioração causada às fibras. Lima (2004) avaliou a adição de metacaulinita para fabricar matriz livre de hidróxido de cálcio, obtendo resultados positivos ao substituir 30% e 40% do teor de cimento. Entretanto, em relação ao comportamento mecânico, para que haja o maior incremento na resistência encontrou-se o teor de 20% como ideal para substituição de cimento por metacaulinita, a partir do qual se inicia o decréscimo da resistência à compressão (GONÇALVES et al., 2003).

Em concordância com o exposto anteriormente, os tratamentos superficiais em fibras naturais, mostram-se como outra forma de diminuir o processo de degradação da fibra no meio cimentício, concedendo atributos de cunho mecânico e de durabilidade aos compósitos a base de cimento. O processo hornificação, por exemplo, tem sido instaurado para tratamento das fibras vegetais, pois atua modificando o desempenho mecânico à tração direta das fibras naturais, tornando-as mais resistentes e aumentando sua capacidade de deformação.

Por conseguinte, constata-se que a busca por modificar as características das fibras naturais pela aplicação de algum tipo de tratamento, apresenta-se como uma alternativa benéfica no âmbito de resistência mecânica e interação de aderência

entre a matriz e a fibra, visto que este pode ocasionar um impacto importante nas propriedades do compósito e atuar como um incremento na capacidade de ancoragem da fibra à matriz. Ademais, os tratamentos superficiais reduzem a fragilização da fibra vegetal quando exposta a sistemas baseados em cimento, e, também, influenciam diretamente no comportamento de aderência, ocasionando um aumento da resistência na ligação fibra-matriz para diferentes tipos de fibras naturais (FERREIRA et al., 2012; FERREIRA et al., 2015).

Neste contexto, o presente trabalho visa estudar o comportamento de fibras de sisal tratadas superficialmente utilizando tratamento polimérico à base de poliestireno expandido (EPS) dissolvido em tolueno, com adição de Sílica de Casca de Arroz (SCA), no que tange às solicitações mecânicas de tração direta e do seu desempenho de aderência quando utilizadas como reforço de compósitos cimentícios em matriz livre de hidróxido de cálcio.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo geral

O objetivo principal desta pesquisa consiste em verificar a capacidade de absorção, o desempenho quanto à tração direta de fibras de sisal submetidas ao tratamento polimérico utilizando EPS e SCA e, também, avaliar seu comportamento de aderência quando aplicada como reforço em uma matriz à base de cimento Portland.

1.1.2 Objetivos específicos

- 1 – Estudar a influência do tratamento polimérico com EPS e SCA na capacidade de absorção das fibras de sisal;
- 2 – Analisar através de imagens a superfície das fibras de sisal após o tratamento;
- 3 – Avaliar o comportamento à tração direta das fibras de sisal tratadas superficialmente com polímero EPS e SCA;
- 4 – Verificar o comportamento das fibras de sisal tratadas com EPS e SCA no que se refere à aderência na interação fibra-matriz.

2. CONCEITOS GERAIS E REVISÃO DE LITERATURA

Neste capítulo mostra-se a fundamentação teórica utilizada, na qual são enfatizadas algumas considerações pertinentes ao estudo com base em revisões da literatura. Serão abordadas as características e comportamento das fibras vegetais, com ênfase na fibra de sisal; a influência do tratamento superficial sobre o comportamento mecânico das fibras naturais; as propriedades mecânicas dos compósitos cimentícios reforçados por fibras vegetais; e a relação de aderência na interface de ligação entre a fibra e matriz cimentícia.

2.1 Fibras naturais

O uso de fibras naturais como reforço em concretos tem se transformado em uma alternativa cada vez mais interessante para a indústria da construção civil, devido ao seu baixo custo, vasta disponibilidade e por ser facilmente ajustável ao formato desejado. Particularmente, em países não desenvolvidos, a utilização desse tipo de fibra torna-se ainda mais vantajosa, por necessitar de um baixo grau de industrialização, tal como por demandar menor quantidade de energia para sua obtenção e processamento quando comparada às fibras de reforço sintéticas (SILVA, 2009).

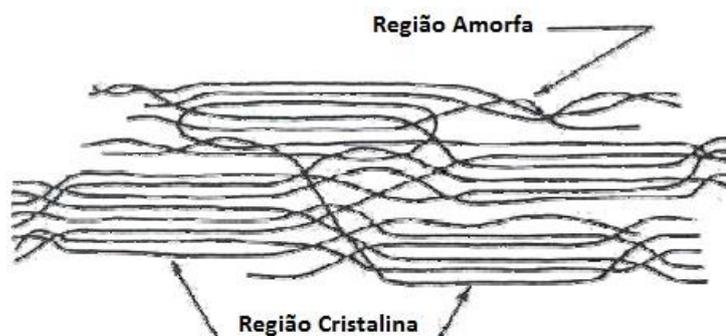
Em materiais compósitos, quando se faz referência a produtos leves, considera-se que optar pela adição de fibras vegetais como material de reforço pode ser mais eficaz, uma vez que suas propriedades mecânicas aproximam-se ou até mesmo ultrapassam àquelas associadas às fibras sintéticas (DEFOIRDT et al., 2010).

A fibra natural é formada por inúmeras células estruturadas por microfibrilas cristalinas de celulose, que são ligadas por meio de uma camada amorfa composta por lignina e hemicelulose (TOMCZAK, 2010). A estrutura hierárquica das fibras vegetais evidencia grande complexidade, posto que cada fibra compõe-se por várias fibrocélulas, as quais são formadas por quatro partes principais: parede primária, parede secundária, parede terciária e o lúmen (BENTUR; MINDESS, 2007).

A celulose é um dos componentes mais importantes e determina as propriedades mecânicas compreendidas pelas fibras vegetais. Esta é classificada como um polissacarídeo, constituída de carbono, oxigênio e hidrogênio, sendo sua

fórmula química descrita por $(C_6H_{10}O_5)_n$ (TOMCZAK, 2010). As fibras celulósicas podem ser percebidas em vários níveis de orientação, como ilustra a Figura 1.

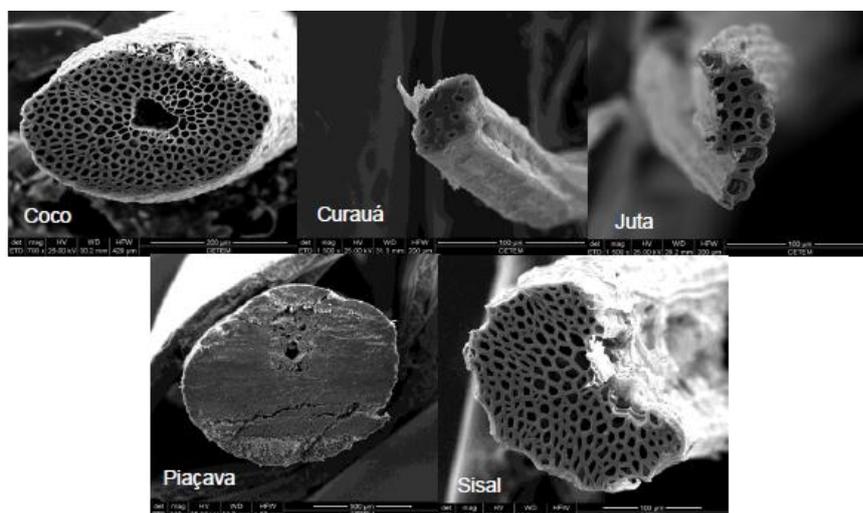
Figura 1 – Esquema de orientação molecular uma microfibrila celulósica



Fonte: Smook apud Tomczak (2010, p. 10)

Segundo Pereira et al. (2012), mesmo que as fibras naturais apresentem um padrão morfológico, é possível observar diferenças constitucionais, como pode ser visto na Figura 2, através de imagens por microscopia eletrônica de varredura da seção transversal realizadas para fibras de coco, curauá, juta, piaçava e sisal.

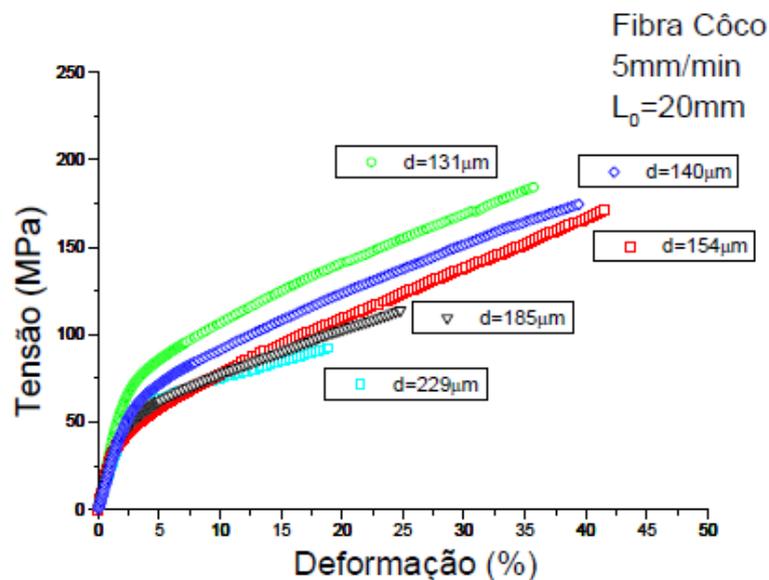
Figura 2 – Imagens de MEV das fibras de coco, curauá, juta, piaçava e sisal



Fonte: Pereira et al. (2012, p. 4181)

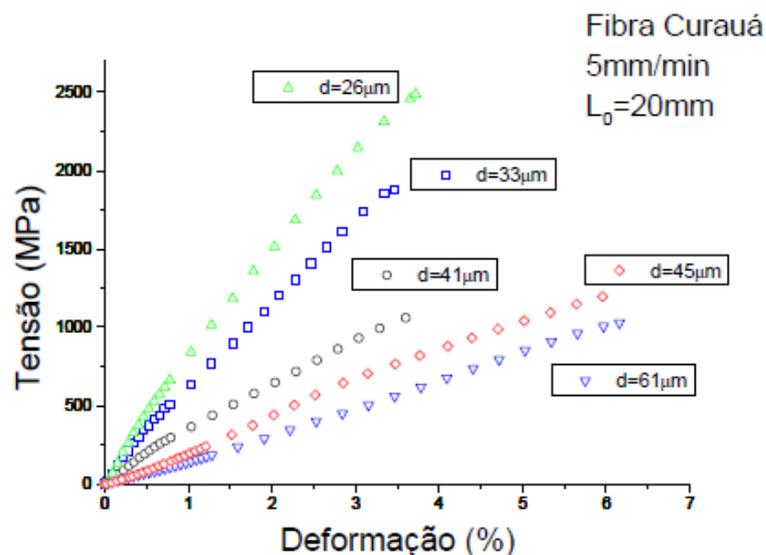
Tomczak (2010) realizou ensaios de tração à ruptura em fibras de coco e curauá, com diâmetros variando entre 131 a 229 μm e 26 a 61 μm , respectivamente, resultando nas curvas de tensão x deformação apresentadas na Figura 3 e Figura 4.

Figura 3 – Curva tensão x deformação de fibras de côco com diferentes diâmetros para velocidade 5 mm/min e distância entre as garras de 20 mm



Fonte: Tomczak (2010, p.42)

Figura 4 – Curva tensão x deformação de fibras de curauá com diferentes diâmetros para velocidade 5 mm/min e distância entre as garras de 20 mm



Fonte: Tomczak, (2010, p.58)

Baseando-se nesses resultados, Tomczak (2010) define que há uma diminuição da tensão de ruptura de 310 a 131 MPa e do módulo elástico de 96 a 30 GPa com o aumento do diâmetro da fibra de 26 a 61 μm . Este fato pode ser explicado pela alteração dos parâmetros estruturais das fibras, como a variação do número de células constituintes, volume das células e número de defeitos. Esse comportamento é semelhante ao das fibras de abacaxi e linho, porém são contrários

aos encontrados para as fibras de banana, sisal, palmeira talipot, coco do Brasil e palmyra Índia.

Analisando as fibras de juta e sisal, Pereira et al. (2012) verificaram que estas têm a mesma espessura de parede celular, porém, a fibra de juta, mesmo possuindo área real menor do que a do sisal, resiste a uma tensão menor. Esse comportamento pode ser justificado pelo maior teor de celulose existente na fibra de sisal, principal componente responsável pela resistência a tração, do que na fibra de juta. Com isso, observaram que a resistência à tração das fibras naturais não está somente associada à morfologia, tal qual depende da sua composição química.

A durabilidade das fibras naturais mostra-se prejudicada quando essas são utilizadas para reforçar compósitos cimentícios, bem como ao serem expostas a ambientes úmidos (SILVA, 2009). Em consequência do progresso da degradação, os produtos de hidratação, como silicato de cálcio hidratado (CSH) e hidróxido de cálcio (CaOH_2), infiltram-se gradualmente na parede celular, o que, por sua vez, leva à mineralização e fragilização da fibra natural. Diante disso, como resultado desse processo de deterioração, há um decréscimo dos níveis de tenacidade dos compósitos reforçados por fibras vegetais (SILVA, 2009; TOLEDO FILHO, 1997; WEI; MEYER, 2015).

2.1.1 Fibra de sisal

O sisal, denominado cientificamente como *Agave Sisalana*, faz parte da família *Agavaceae*, sendo esta originária do México. Apesar de sua origem, os três principais produtores mundiais de sisal são o Brasil, a China e a Tanzânia (DA GLORIA, 2015). Dentro das folhas de *Agave*, no sentido longitudinal, encontram-se as fibras de sisal, podendo medir entre 1,0 m a 1,5 m de comprimento e diâmetro variando em torno de 0,1 mm a 0,3 mm (LI; MAI; YE, 2000).

A Figura 5 (a) mostra a planta de sisal de onde são extraídas as fibras e, (b) as fibras na forma posterior ao processo de extração e beneficiamento (MELO FILHO, 2005).

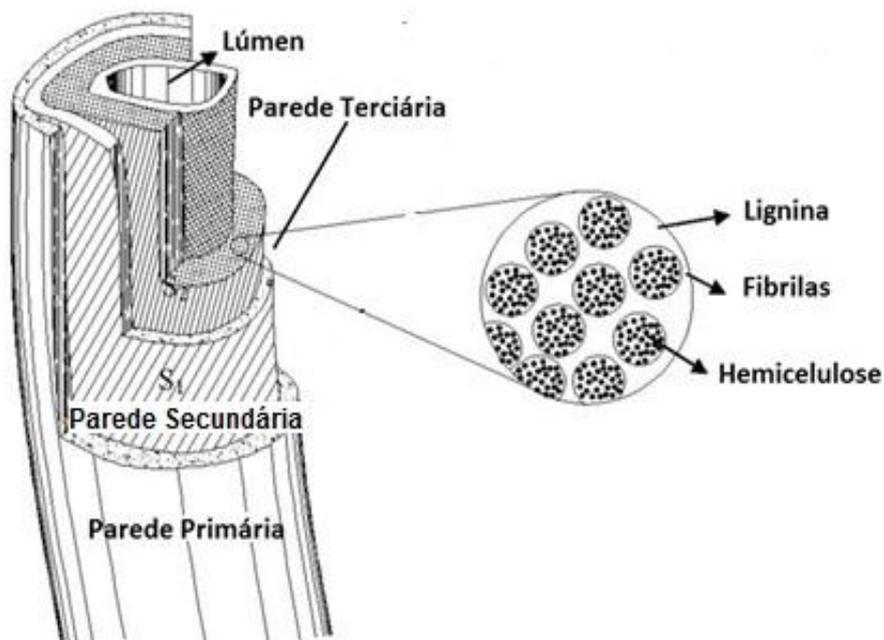
Figura 5 – (a) planta de sisal e (b) fibras de sisal após beneficiamento



Fonte: Melo Filho, (2005, p. 11)

A fibra de sisal é constituída por 73% de celulose, 13% de hemicelulose, 11% de lignina e 2% de pectina (MWAIKAMBO; ANSELL, 2002). Toledo Filho et al. (2009) representaram esquematicamente, como mostrado na Figura 6, a microestrutura complexa da célula de fibra de sisal.

Figura 6 – Desenho esquemático mostrando as diferentes camadas de uma célula individual de fibra de sisal

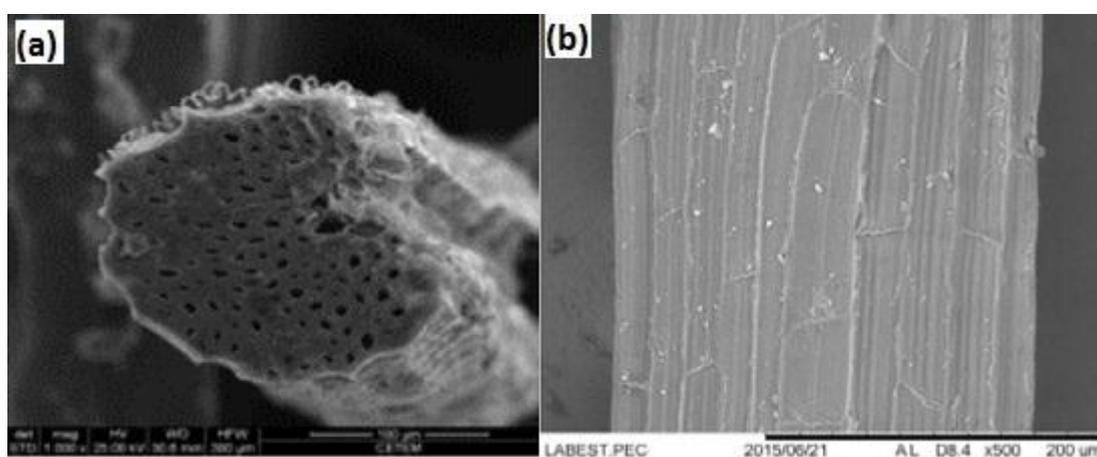


Fonte: Adaptado de Toledo Filho et al. (2009)

As fibras de sisal dispõe de uma a estrutura hierárquica com morfologia variável, possuindo seção transversal irregular e apresentando forma retorcida,

assemelhando-se a uma ferradura ou um arco. Visto isso, para que se obtenham resultados precisos de módulo de elasticidade, resistência à tração e deformação, devem ser consideradas as áreas irregulares das fibras, a contribuição da flexibilidade do sistema de ensaios e atribuir elevada resolução na medida da carga e deslocamento (SILVA, 2009). Na Figura 7, pode ser observada a superfície e seção transversal da fibra de sisal, obtida por análise de microscopia eletrônica de varredura (SANTOS, 2016).

Figura 7 – Imagens de MEV da: (a) seção transversal e (b) superfície da fibra de sisal



Fonte: Santos, (2016, p.14)

Em virtude da irregularidade da seção transversal e da complexidade da estrutura das fibras naturais, verificam-se dificuldades para calcular sua área e, por consequência as tensões de tração (BENTUR; MINDESS, 2007). Santos et al. (2015) constataram que a área média da seção transversal de uma fibra de sisal é de 0,023 mm², possuindo em média 144 fibrocélulas, com resistência à tração de 453,23 MPa, com um módulo de 20 GPa.

Neste contexto, tal ocorrência torna instigante o estudo das fibras vegetais, pois amplia a possibilidade de melhoria dos resultados no que tange ao comportamento mecânico e ao mecanismo de aderência das fibras com a matriz, uma vez que a propriedade de ancoragem é influenciada diretamente pela forma da fibra (SILVA, 2009).

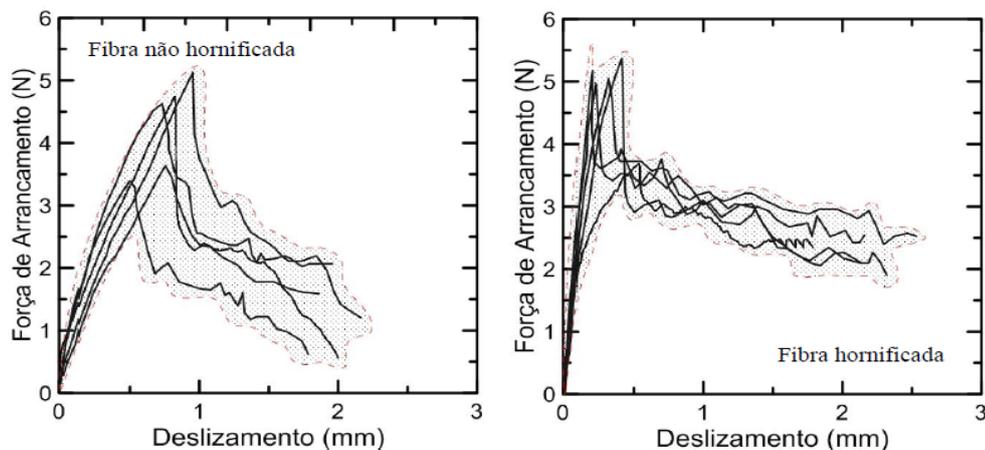
2.2 Influência de tratamentos superficiais no comportamento mecânico das fibras

O tratamento superficial das fibras é eficaz para aprimorar o comportamento mecânico e aumentar o desempenho da durabilidade de compósitos cimentícios reforçados por fibras naturais. Vários estudos de tratamentos, incluindo impregnação da fibra com agentes repelentes e bloqueadores de água, selagem do sistema de poros da matriz, redução da alcalinidade da matriz e combinação da impregnação da fibra e modificação da matriz, foram realizados visando melhorar o comportamento mecânico das fibras (BRANCATO, 2008; FERREIRA, 2012, 2016; FIDELIS, 2014; LIMA, 2004; SILVA, 2009).

A aplicação de ciclos de molhagem e secagem nas fibras é um tipo de tratamento cujo procedimento é conhecido como hornificação, este processo causa às fibras redução da capacidade de retenção de água, modificando também seu comportamento mecânico (BRANCATO, 2008). Os resultados encontrados pela aplicação do processo de hornificação em fibras de sisal mostram-se benéficos na ligação entre a fibra e matriz com a aplicação de 10 ciclos de molhagem e secagem, observando-se um aumento na fase adesional em até 40% na tensão de aderência máxima e 50% da tensão friccional (FERREIRA, 2012; FERREIRA et al., 2012, 2015, 2017). Ademais, os ciclos de molhagem e secagem podem melhorar as propriedades mecânicas e a resistência da união fibra-matriz para diferentes tipos de fibras naturais, como observado no trabalho de Ferreira et al. (2017).

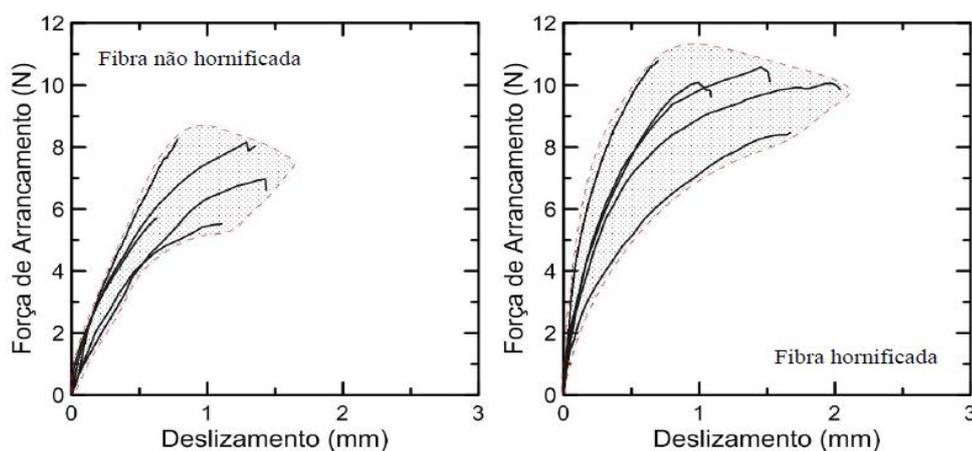
Ferreira (2012) avaliou a relação de aderência em compósitos cimentícios reforçados com fibras de sisal hornificadas para dois comprimentos de embebimento, 25 mm e 50 mm, utilizando uma matriz livre de hidróxido de cálcio. Baseando-se nos resultados apresentados através das curvas de arrancamento mostradas nas Figuras 8 e 9, percebe-se que para ambos os comprimentos de embebimento submetidos à hornificação foi possível obter uma melhoria na capacidade de ancoragem da fibra à matriz, ocorrendo um acréscimo tanto na carga de decoesão quanto na de arrancamento.

Figura 8 – Curva carga x deslizamento para comprimento de embebimento de 25 mm



Fonte: Ferreira (2012, p. 69)

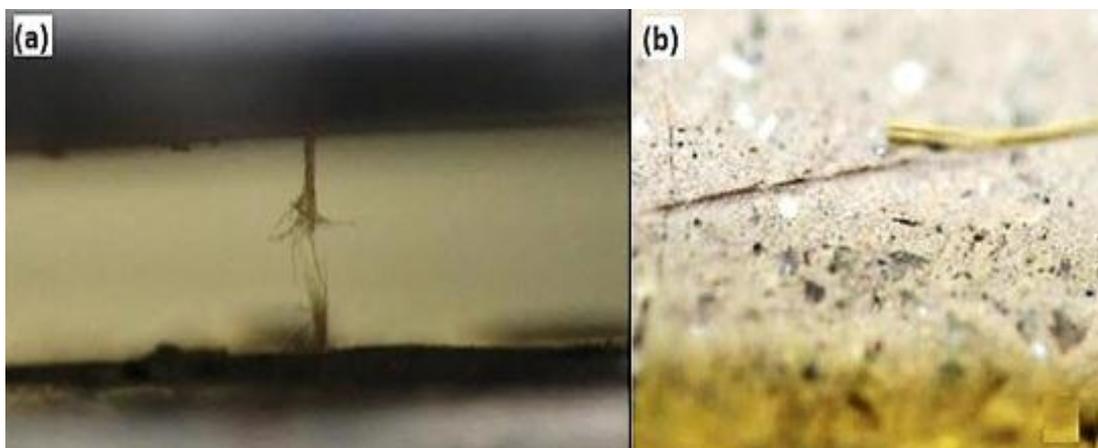
Figura 9 – Curva carga x deslizamento para comprimento de embebimento de 50 mm



Fonte: Ferreira (2012, p. 69)

Ferreira (2012) observou também, que para o comprimento de 50 mm de embebimento, ocorreu o rompimento da fibra para a maioria das amostras ensaiadas, sendo essa ruptura ocorrida tanto no exterior como no interior do corpo de prova, como mostra a Figura 10. Tal fato sugere a suficiência do comprimento utilizado, mostrando que foi possível atingir a máxima resistência à tração da fibra, comportamento similarmente encontrado por Toledo Filho (1997) para fibras com mesmo comprimento de embebimento. Embora esse comportamento tenha ocorrido tanto para as fibras tratadas e não tratadas, foram observadas cargas mais altas (5 a 9N) para os corpos de prova em que foram utilizadas as fibras hornificadas.

Figura 10 – (a) detalhe do rompimento da fibra não tratada no exterior do corpo de prova durante o ensaio de arrancamento e (b) detalhe da ruptura ao longo do corpo de prova da fibra tratada durante o ensaio de arrancamento



Fonte: Adaptado de Ferreira (2012)

Além da hornificação, outras formas de tratamento para fibra de sisal foram estudadas por Ferreira et al. (2015), como o tratamento alcalino com hidróxido de cálcio, a impregnação polimérica com estireno butadieno e tratamento híbrido, uma combinação de hornificação e impregnação polimérica.

Comparando-se os resultados para as fibras de sisal tratadas com as fibras em estado natural, a resistência à tração direta aumentou após todos os tratamentos, obtendo-se melhores resultados para as fibras tratadas com o tratamento híbrido (727,46 MPa) e com o tratamento polimérico (722,07 MPa). Este incremento na tensão de tração pode ser explicado pela alteração na cristalinidade da celulose, redução do material amorfo e aumento da rigidez, resultado da interação do polímero com a fibra de sisal e dos fenômenos de hornificação.

Ferreira et al. (2015), constataram através dos testes de arrancamento nos compósitos utilizando fibras tratadas por polimérico, uma ligação fibra-matriz mais elevada atuando como reforço na ligação interfacial, o que possibilita supor que este atue como uma ponte de aderência entre a fibra e a matriz. Tal ocorrência mostra que ao tratar com polímero as fibras utilizadas para reforçar matrizes cimentícias, obtém-se não somente satisfatório mecanismo de atrito, como também uma melhora no comportamento de rigidez por deslizamento.

Mediante análise da microscopia eletrônica de varredura, Figura 11, é possível observar a formação de uma película criada pela impregnação do polímero sobre a superfície da fibra de sisal e identificar os pontos de ancoragem que fazem o

polímero se tornar um agente que leva à melhoria da adesão, resultando em um endurecimento por escorregamento na extração.

Figura 11 – Imagens de MEV da interface fibra-matriz após teste de arrancamento com fibras de sisal tratadas: (a) tratamento híbrido e (b) tratamento com polímero



Fonte: Adaptado de Ferreira et al. (2015)

O processo de hornificação (5 e 10 ciclos de molhagem e secagem), hornificação alcalina com hidróxido de cálcio (1, 5 e 10 ciclos) e impregnação com polímero estireno butadieno (SBR) para as fibras de curauá, juta e sisal foram estudados por Ferreira (2016). Neste contexto, verificou-se que cada fibra apresentou uma reação diferente a cada tipo de tratamento, fato este que pode ser explicado principalmente pela variação peculiar da composição química, cristalinidade de celulose e outros parâmetros intrínsecos que caracterizam cada uma das fibras analisadas.

Após a impregnação polimérica com estireno butadieno, todas as fibras apresentaram um aumento na resistência à tração final, concluindo-se assim, que as mudanças nas propriedades mecânicas obtidas por tal impregnação, estão diretamente correlacionadas a uma boa afinidade química entre as fibras e o polímero utilizado. A fibra de juta, devido à possível interação entre a celulose e o polímero, apresentou uma maior absorção do mesmo, reduzindo o módulo de Young.

Entretanto, levando em consideração os resultados na interface de aderência através dos testes de retirada para todos os tratamentos (hornificação, hornificação alcalina com hidróxido de cálcio e impregnação com polímero SBR), analisando sua influência fibras sisal, foi possível alcançar uma ligação fibra-matriz mais alta, mostrando não apenas um melhor mecanismo de fricção. Para o tratamento alcalino a fibra de juta foi a que apresentou melhor afinidade, dado que todos os ciclos aplicados foram eficientes para promover uma melhor ligação do reforço com a matriz.

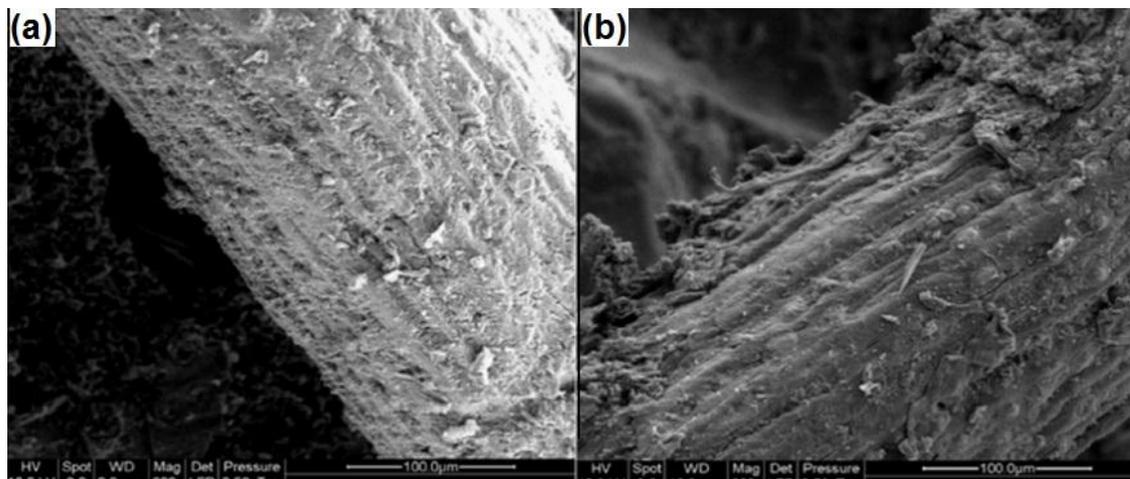
Por efeito de uma possível interação entre celulose e polímero, igualmente entre hidróxido de cálcio e polímero, todas as fibras estudadas apresentaram maior adesão quando submetidas ao ensaio de arrancamento. Observando-se as fibras de curauá e sisal, constatou-se um aumento de até 8 e 38% da resistência adesiva, respectivamente. Similarmente, notou-se um comportamento de endurecimento por deslizamento, precedido por um aumento da força de ligação por fricção (FERREIRA, 2016).

Fidelis (2014) realizou tratamento por impregnação com polímero estireno butadieno em filamento, cordão e tecido juta, para utilização destes em compósitos cimentícios têxteis, realizando um ensaio de absorção no tecido para definir o tempo de impregnação do tecido com o polímero. Para os ensaios de arrancamento, comparando-se os filamentos sem e com tratamento para diferentes comprimentos de embebição, houve uma variação de tensão nominal de aderência entre 0,20 e 0,51 MPa para o filamento sem tratamento e de 0,37 a 1,02 MPa para o filamento tratado.

Tratamentos alcalinos em fibras naturais de coco foram analisados por Yan et al. (2016), neste trabalho as fibras foram primeiramente lavadas três vezes com água corrente para remoção de detritos contaminantes e secas à temperatura ambiente durante 48 horas. As fibras de coco foram imersas em solução de hidróxido de sódio (NaOH) a 5% em peso de amostra por 30 minutos a temperatura de 20 °C e a seguir lavadas 10 vezes com água fresca, a fim de permitir que o álcali absorvido escoasse das fibras. Após as fibras foram secas novamente ao ar por 24 horas e, depois, foram secas em forno a 50 °C durante 8 horas.

As fibras de coco tratadas apresentaram superfícies mais claras e rugosas em comparação com a superfície das fibras não tratadas, como pode ser observado na Figura 12.

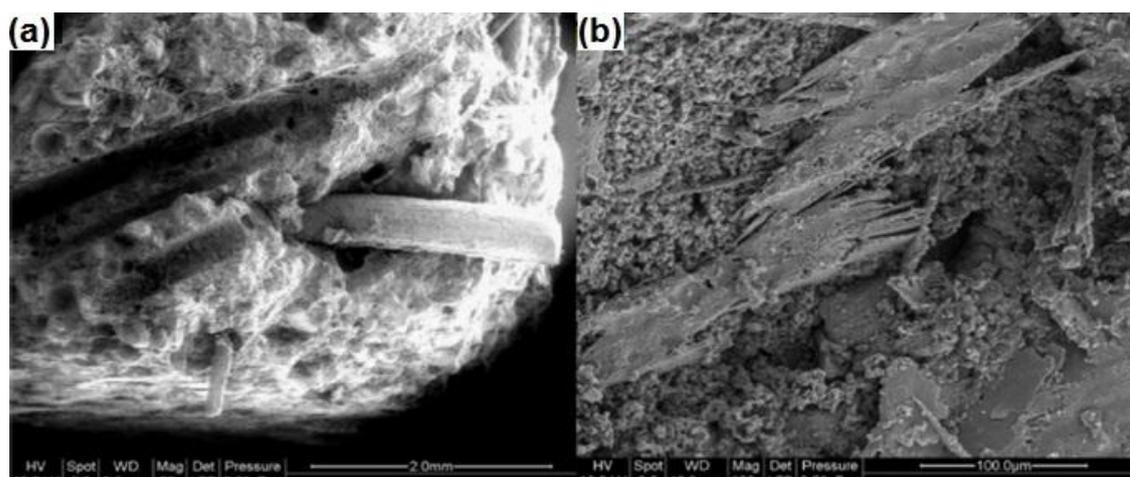
Figura 12 – Superfície da fibra de coco: (a) fibra não tratada e (b) fibra tratada com álcali



Fonte: Yan et al. (2016, p. 179)

Percebe-se ainda, analisando a Figura 13, grande quantidade de resíduo da fibra de coco na superfície da matriz de cimento, indicando que o tratamento alcalino ocasionou uma superfície mais áspera, a qual tende a aumentar o entrelaçamento mecânico e fornecer pontos de ancoragem extra da fibra para o compósito cimentício (YAN et al., 2016).

Figura 13 – Arrancamento da fibra de coco da matriz de cimento: (a) sinais e (b) resíduos de superfície da fibra de coco

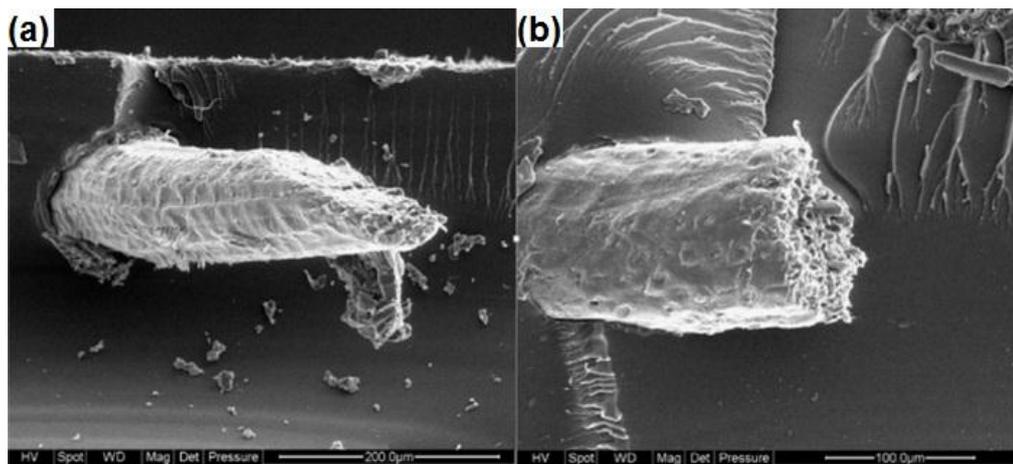


Fonte: Yan et al. (2016, p. 180)

Além disso, Yan et al. (2016) examinaram por MEV o modo de extração da fibra de coco não tratada e tratada com álcali a partir de matriz polimérica. Os autores indicam que, ao analisar Figura 14, notaram a diferença na qualidade da adesão interfacial e constata-se ainda, que na região de contato, a matriz polimérica

envolvente tem uma retração mais atenuada, o que evidencia a necessidade de uma maior carga para retirar a fibra tratada da matriz, apontando um efeito positivo do tratamento alcalino na ligação interfacial fibra-matriz, o que, por sua vez, leva a melhores propriedades mecânicas dos compósitos.

Figura 14 – Imagens de MEV do arrancamento das fibras de coco em meio a matriz cimentícia: (a) não tratada e (b) tratada com álcali



Fonte: Yan, (2016, p. 176)

Fernandes et al. (2017) analisaram o comportamento à tração de compósitos poliméricos de polietileno reforçados com fibras de sisal submetidas a tratamentos químicos. Para tal, realizaram quatro tipos de tratamentos nas fibras para posterior mistura com a matriz polimérica: branqueamento (processo químico de remoção da lignina), hidrólise ácida, branqueamento modificado com pulverização de nanosílica silanizada e acidificação modificada com pulverização de nanosílica silanizada.

Os compósitos que utilizavam fibras acidificadas contendo as nanopartículas de sílica obtiveram maior incremento para tensão máxima de ruptura, podendo esse acréscimo ser justificado pela redução de tamanho das fibras, causado pelo seu desfibrilamento acompanhado da modificação da superfície das fibras de sisal com a sílica silanizada, tornando-as mais hidrofóbicas. Para todos os casos, a presença da sílica resultou em compósitos com melhores propriedades mecânicas.

Sabe-se que, além da degradação em ambiente alcalino, as fibras vegetais estão sujeitas a deterioração por ataque de ácidos e agentes biológicos, pelo fato destas serem biodegradáveis. Contudo, independente da aplicação de soluções químicas ou processos físicos, ainda se faz presente a escassez de informações

sobre como esses tratamentos alteram a estrutura e morfologia das fibras vegetais e afetam a aderência entre a fibra e a matriz (SANTOS, 2016).

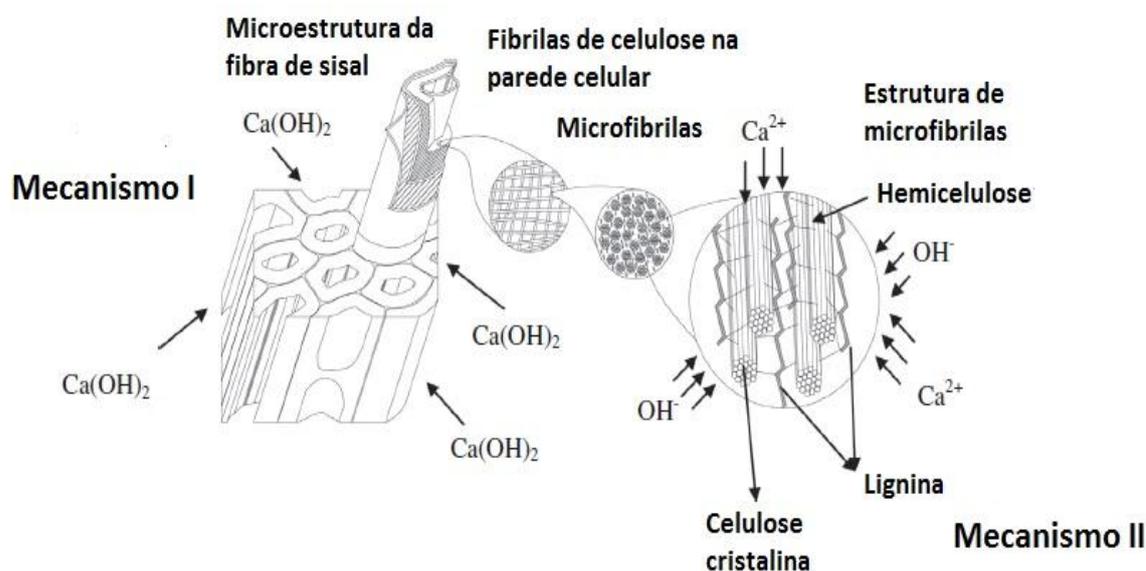
2.3 Compósitos reforçados com fibras

As possibilidades de desenvolvimento de materiais compósitos ampliaram-se significativamente a partir dos avanços dos materiais tradicionais e com o surgimento de novos materiais, tais como os polímeros, trazendo consigo o aparecimento de novos estudos de compósitos sejam eles a base de matriz polimérica, metálica ou cimentícia (LIMA, 2004).

A adição de fibras naturais, que em sua maioria possuem baixo módulo, como elemento de reforço em meio as matrizes de cimento mostra-se mais benéfica para promover o aumento na tenacidade da matriz do que para incremento da resistência (MELO FILHO, 2012). As fibras vegetais reduzem a resistência à compressão da matriz e, de forma ínfima, o módulo de elasticidade, porém através do confinamento do material, auxiliam no retardamento da propagação da primeira fissura dos compósitos e atuam aumentando a ductilidade pós-pico do material (TOLEDO FILHO, 1997).

Melo Filho, Silva e Toledo Filho (2013) sugeriram dois mecanismos que promovem a degradação da fibra de sisal em meio a matriz cimentícia, como pode ser observado na Figura 15. O principal mecanismo é a deposição de cristais de hidróxido de cálcio na superfície da fibra levando-as a um processo de mineralização. O mecanismo secundário e, por sua vez, menos agressivo corresponde a decomposição da hemicelulose e lignina nas fibras após ciclos de molhagem e secagem, onde, com base na hipótese levantada pelos autores, tal decomposição é decorrente da absorção de íons cálcio e hidroxilas pela superfície da fibra de sisal.

Figura 15 – Mecanismos de degradação da fibra de sisal em ambiente cimentício



Fonte: Traduzido de Melo Filho, Silva e Toledo Filho (2013, p. 38)

A ocorrência do processo de mineralização das fibras vegetais utilizadas como reforço no meio alcalino de matrizes cimentícias compromete a durabilidade do compósito, aumentando a fratura da fibra e diminuindo a resistência ao arrancamento. Sendo assim, verificou-se a necessidade de estudar a influência da substituição de teores de cimento da matriz por adições minerais. As adições trabalham promovendo reações pozolânicas a partir do consumo do hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2) presente na matriz de cimento, produzindo silicato de cálcio hidratado (CSH) e tornando-a livre da base. A substituição parcial do cimento por 50 % de argila calcinada e metacaulinita resultou em matrizes livres de hidróxido de cálcio, elevando a durabilidade e não prejudicando o comportamento mecânico dos compósitos (MELO FILHO, 2012; MELO FILHO; SILVA; TOLEDO FILHO, 2013; SILVA, 2009; TOLEDO FILHO et al., 2009).

A influência do uso da substituição parcial de cimento por outro material aglutinante apresenta resultados positivos quanto à resistência mecânica, diminuindo a absorção e índice de vazios da matriz (LIMA et al., 2008). Outro aspecto benéfico conferido a matriz livre de hidróxido de cálcio reforçada com fibras naturais está relacionado com a durabilidade, onde quando os compósitos são submetidos a processos de envelhecimento acelerado não é identificada deterioração da fibra (LIMA, 2004; LIMA et al., 2008; MELO FILHO, 2012; TOLEDO FILHO et al., 2009).

2.4 Interface de aderência fibra-matriz

A interação fibra-matriz apresenta-se como uma característica imprescindível dos compósitos reforçados com fibras, pois influi de forma imponente no seu desempenho quando estes são expostos a esforços mecânicos. Portanto, a compreensão dessa ação mútua, torna-se extremamente necessária para pressupor o comportamento dos compósitos (FERREIRA, 2012).

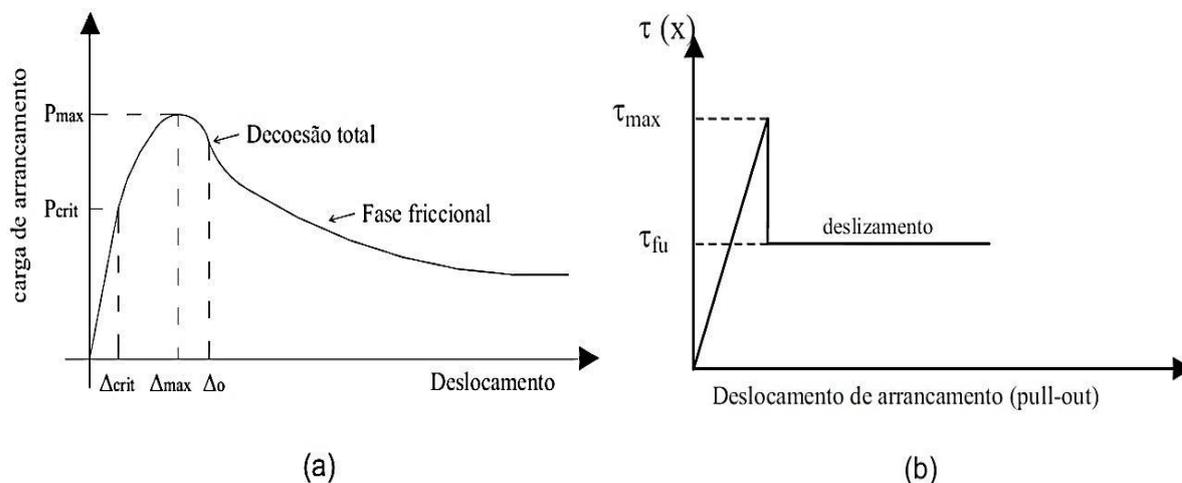
O principal procedimento estudado no caso da interação fibra-matriz é a aderência por cisalhamento, a qual é determinada através de ensaios de arrancamento (*pullout*), onde uma força "**P**" é aplicada na fibra até seu total arrancamento da matriz cimentícia (LIMA, 2004).

Caso haja uma boa interação fibra-matriz, o processo de arrancamento segue algumas etapas: durante o início do carregamento ocorre uma interação fibra-matriz de natureza elástica, na qual é admitida uma aderência perfeita; antes da fissuração da matriz, a transferência de tensões elásticas é o mecanismo predominante, onde os deslocamentos vistos na matriz e na fibra são geometricamente correlatos; em estágios mais evoluídos do carregamento, ocorre à perda de aderência (decoesão) na interface por cisalhamento elástico, promovendo deslocamento relativo entre a matriz e a fibra e, ao fim da tensão por cisalhamento friccional, acontece o que corresponde à ruptura ou arrancamento total da fibra (FERREIRA, 2012; LIMA, 2004).

A transição de tensão elástica para tensão friccional ocorre quando a tensão cisalhante interfacial devido ao carregamento excede a resistência ao cisalhamento fibra-matriz, conhecida como tensão cisalhante de aderência τ_{au} , ou resistência de aderência τ_{max} . A carga correspondente é denominada carga crítica, P_{crit} . A resistência última cisalhante na interface fibra-matriz, denominada τ_{fu} , acontece quando a carga aplicada atinge a carga máxima, P_{max} . (LIMA, 2004, p. 16)

A Figura 16 apresenta curvas de arrancamento ditas ideais considerando relações entre a carga e tensão pelo deslocamento, respectivamente (LIMA, 2004).

Figura 16 – Curvas idealizadas para (a) carga x deslocamento e (b) tensão x deslocamento



Fonte: Lima (2004, p. 17)

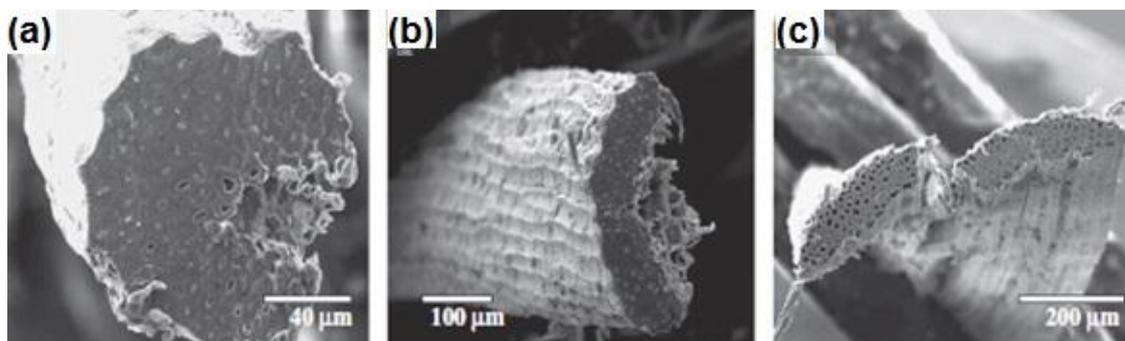
As matrizes mais utilizadas são aquelas que têm como material base o cimento Portland e, em menor escala, a cal e o gesso. As matrizes cimentícias são compostas de aglomerantes minerais, podendo incluir agregados, que originam as pastas, argamassas ou concretos. A incorporação de fibras nas matrizes pode aprimorar as suas propriedades mecânicas, como a resistência à tração, à flexão e ao impacto, além de alterar seu comportamento após fissuração, diminuindo a probabilidade de uma ruptura brusca da matriz de cimento (AGOPYAN; SAVASTANO JR, 2007).

As fibras naturais apresentam valores de tensão de adesão próximos ao das fibras sintéticas, entretanto, a baixa adesão química e elevada capacidade de absorção de água das fibras de sisal, possibilitam variações em seu volume ocasionando grande perda de contato com a matriz (LI; HU; YU, 2008). Desse modo, para que a fibra atinja a tensão máxima de tração antes de ser arrancada da matriz, faz-se necessário um grande comprimento de embebiamento da fibra para garantir maior ancoragem desse reforço em meio a matriz e, conseqüentemente, carga máxima de arrancamento (FERREIRA, 2012; FERREIRA et al., 2015; FERREIRA et al., 2016; SILVA et al., 2011).

No tocante às fibras vegetais, Silva et al. (2011) verificaram para as fibras de sisal, em estado natural, que a sua morfologia interfere diretamente na resistência de adesão. Em sua pesquisa avaliaram-se três diferentes geometrias de seções transversais: ferradura, arco e arco retorcido, como mostrado na Figura 17. Nos ensaios realizados, os autores verificaram os maiores valores de aderência para

aquelas que possuíam seção transversal na forma de arco retorcido, no qual para resistências adesional e friccional, respectivamente, foi de 0,92 e 0,42 MPa.

Figura 17 – Diferentes morfologias da fibra de sisal: (a) ferradura, (b) arco e (c) arco retorcido



Fonte: Adaptado de Silva et al. (2011)

O uso de métodos para tratar superficialmente as fibras vem sendo implementado com intuito de contribuir às suas propriedades mecânicas, eliminando impurezas da superfície, melhorando a estabilidade volumétrica da fibra. Os tratamentos também tendem a melhorar a aderência fibra-matriz, seja por processos físicos com intuito de modificar a estrutura da fibra ou por estabilização dimensional, em razão de que ambas as alterações resultam em um acréscimo na aderência da fibra com a matriz de cimento (SANTOS, 2016).

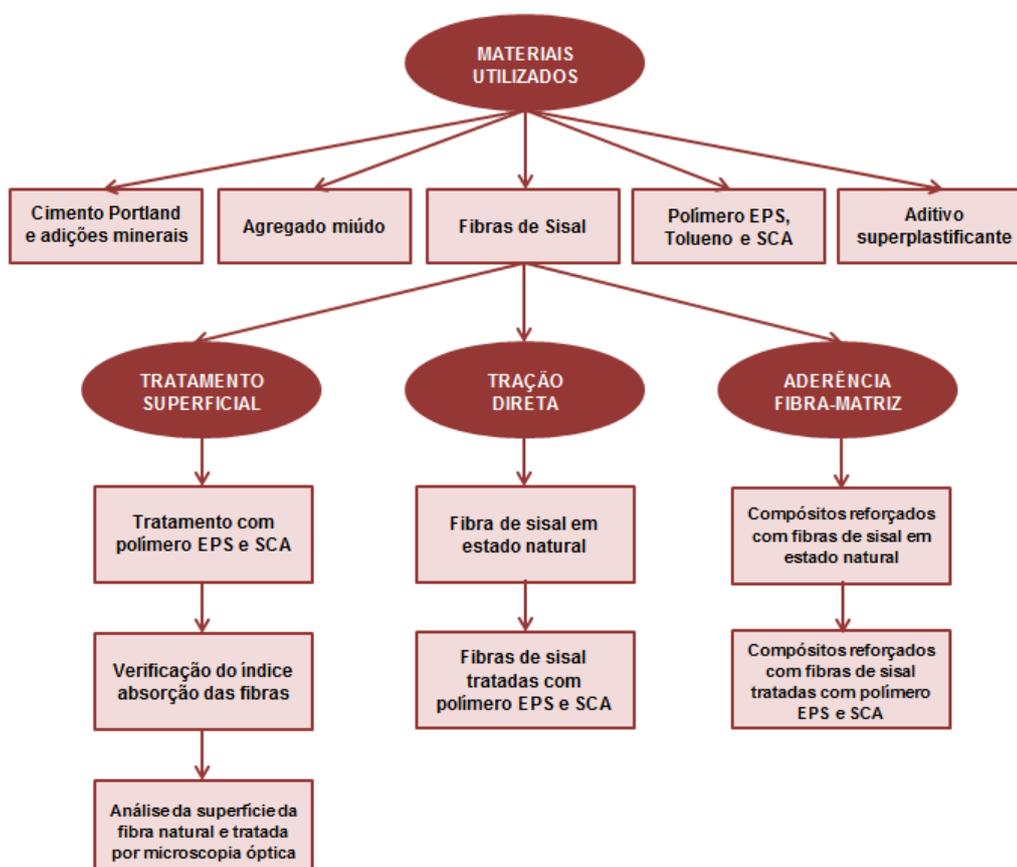
3. METODOLOGIA

Neste capítulo encontram-se indicados os materiais que foram utilizados para execução da pesquisa pertinente a este trabalho, bem como, a abordagem dos procedimentos experimentais que foram empregados para realização do tratamento polimérico com SCA nas fibras de sisal, verificando posteriormente as modificações superficiais através de microscopia óptica.

Abordam-se os métodos utilizados para obtenção das amostras a fim de verificar o índice de absorção e realizar as análises do desempenho quanto à resistência à tração direta das fibras tratadas quimicamente, como também, a moldagem dos corpos de prova para verificar a resistência ao arrancamento, ou seja, a relação de aderência entre a fibra tratada e a matriz cimentícia.

Com intuito de melhorar a compreensão sobre as etapas de execução das atividades desse estudo, na Figura 18 pode ser visualizado o fluxograma do programa experimental mostrando as etapas de maneira simplificada.

Figura 18 – Fluxograma simplificado do programa experimental



Fonte: Elaboração própria

3.1 Materiais utilizados

Utilizaram-se para a produção dos compósitos os materiais citados a seguir:

- cimento Portland CP V-ARI;
- cinza volante;
- metacaulim;
- areia;
- poliestireno expandido;
- tolueno;
- sílica de casca de arroz;
- fibra de sisal;
- aditivo superplastificante.

3.1.1 Cimento Portland e adições minerais

Para elaboração deste estudo utilizou-se cimento Portland CP V-ARI (CP) proveniente de doação da empresa Rosário Postes. As adições minerais consistiram em: cinza volante (CV) proveniente de doativo da termoelétrica de Candiota e metacaulim (MC) adquirido da empresa Metacaulim do Brasil Indústria e Comércio Ltda.

Na Figura 19 pode ser visualizado o cimento e adições minerais.

Figura 19 – Material aglomerante e adições minerais utilizadas: (a) cimento Portland CP V-ARI; (b) cinza volante e (c) metacaulim



Fonte: Elaboração própria

3.1.2 Agregado miúdo

O agregado miúdo empregado foi obtido do leito do rio Ibicuí no município de Manoel Viana/RS, sendo este já caracterizado por Mendes (2014) conforme demonstrado na Tabela 1. A Figura 20 mostra a areia a ser utilizada.

Tabela 1 – Caracterização do agregado miúdo (areia)

Areia Fina		
Módulo de Finura	Dimensão Máxima Característica (mm)	Massa Específica (kg/dm ³)
1,37	0,60	2,63

Fonte: Adaptado de Mendes (2014)

Figura 20 – Agregado miúdo utilizado (areia)



Fonte: Elaboração própria

3.1.2 Sílica de Casca de Arroz

Para realização do tratamento nas fibras de sisal fez-se uso de Sílica de Casca de Arroz proveniente da empresa Pilecco Nobre. A Figura 21 mostra a sílica utilizada nesta pesquisa.

Figura 21 – Material utilizado para promover o tratamento nas fibras de sisal: Sílica de Casca de Arroz



Fonte: Elaboração própria

3.1.3 Fibras de sisal

As fibras de sisal foram obtidas no Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia (COPPE) da Universidade Federal do Rio de Janeiro e são provenientes do município de Valente/BA. As fibras foram previamente lavadas e secas, não sendo submetidas a nenhum tipo de tratamento prévio. A Figura 22 mostra as fibras de sisal utilizadas neste estudo.

Figura 22 – Fibras de sisal



Fonte: Elaboração própria

3.1.4 Aditivo superplastificante

O aditivo superplastificante (SP) utilizado é do tipo PA (Poliacrilato) Glenium 51, como pode ser visto na Figura 23. O PA possui 31,20% de teor de sólidos, 1073 kg/m³ de massa específica e pH 6,2, segundo informações do fabricante.

Figura 23 – Aditivo superplastificante



Fonte: Elaboração própria

3.2 Tratamentos superficiais nas fibras

O modo utilizado para tratar as fibras de sisal consistiu em realizar a impregnação do polímero termoplástico EPS com adição de SCA nas fibras, possibilitando a síntese de ambos os materiais, a fim de promover uma ligação entre a fibra e as partículas de sílica, através da ponte de aderência formada a partir do uso do polímero.

O solvente utilizado foi o Toluol P.A. ($C_6H_5CH_3$), conhecido como Tolueno, sendo este escolhido por possuir melhor reatividade com o EPS, apresentando dissolução integral do polímero em temperatura ambiente.

Para esse procedimento as quantidades iniciais de solvente e polímero foram baseadas naquelas utilizadas por Roca Bruno (1996) em procedimento similar ao utilizado neste estudo. Assim, foram realizados testes fixando a quantidade de solvente e variando em massa as quantidades de EPS e SCA, verificando a viscosidade da solução e capacidade de aderência da solução ao realizar a imersão das fibras de sisal para promover o seu tratamento.

Desse modo, com base nas frações analisadas, para que se obtivesse uma mistura homogênea, a fim de que ocorresse a ligação entre o EPS, a SCA e a fibra de sisal, foram encontradas as quantidades indicadas na Tabela 2.

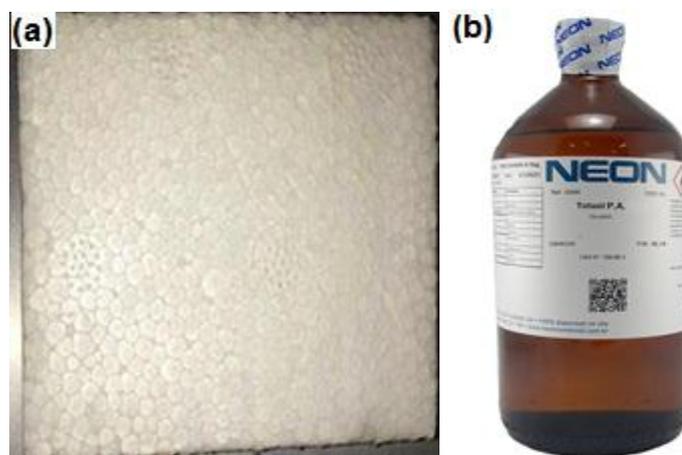
Tabela 2 – Quantidade de materiais para promover o tratamento nas fibras de sisal

Poliestireno expandido	17 g
Toluol P. A.	100 ml
Sílica de Casca de Arroz	0,5 g

Fonte: Elaboração própria

Na Figura 24 são apresentados o polímero e solvente utilizados para promoção do tratamento nas fibras de sisal.

Figura 24 – (a) EPS e (b) Toluol P. A. (Tolueno)



Fonte: Elaboração própria

A Figura 25 mostra o equipamento de banho de ultrassom, modelo UCS 1400A com temporizador digital, que foi utilizado para proporcionar a solubilização do soluto.

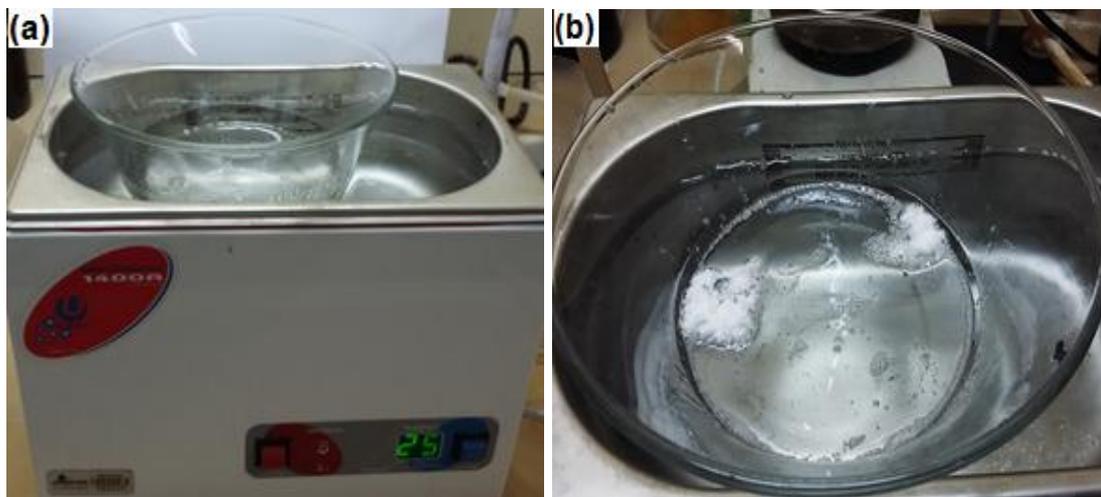
Figura 25 – Equipamento para banho ultrassônico



Fonte: Elaboração própria

Inicialmente foi realizada solubilização do EPS no solvente Tolueno, como mostra a Figura 26, por meio de agitação no equipamento de banho ultrassônico pelo tempo de 25 minutos, visando manter a padronização do processo.

Figura 26 – (a) sistema para dissolução do polímero em solvente por meio de banho ultrassônico e (b) ampliação



Fonte: Elaboração própria

Após, foi adicionada a Sílica de Casca de Arroz e realizada a agitação durante 10 minutos até que suas partículas se solubilizassem na base polimérica, como pode ser visualizado na Figura 27.

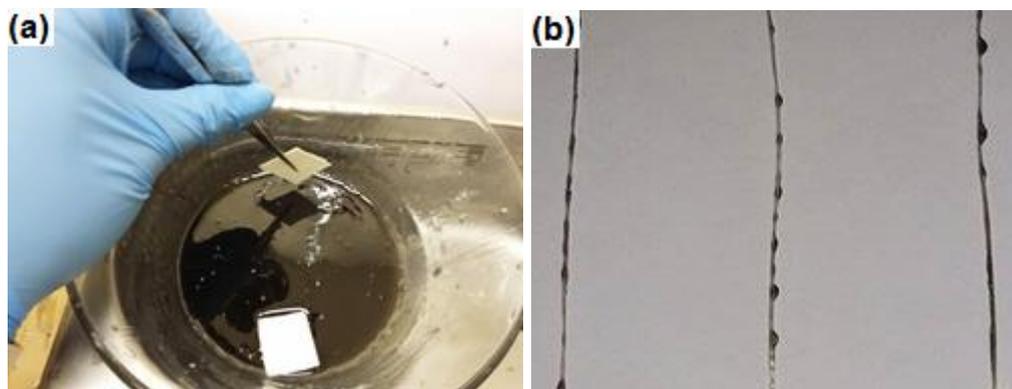
Figura 27 – Solução polimérica utilizando EPS com adição de SCA



Fonte: Elaboração própria

As fibras de sisal foram imersas na solução e, ao serem retiradas, permaneceram por 24 horas em estufa para secagem a uma temperatura de $25^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$. O processo de imersão das fibras na solução polimérica combinada com SCA e as mesmas posteriormente ao tratamento são mostrados na Figura 28.

Figura 28 – (a) procedimento de aplicação do tratamento polimérico com EPS e adição de SCA e (b) fibras de sisal após o tratamento



Fonte: Elaboração própria

3.3 Avaliação da capacidade de absorção das fibras

Para o procedimento utilizado seguiu-se a metodologia proposta por Toledo Filho (1997) a fim de obter o índice de absorção de água (IA) para as fibras de sisal tratadas e não tratadas. Para fibras em estado natural e tratadas foram separadas duas amostras com diversas fibras em filamentos as quais possuíam mesmo peso inicial seco em estufa.

As amostras de fibras foram pesadas em estado seco e, também, após imersão em água durante 3 horas para total saturação, realizou-se uma nova pesagem. Utilizando-se a mesma amostragem inicial de fibras repetiu-se três vezes o processo de pesagem seca e úmida (após imersão das fibras em água pelo tempo mencionado), ou seja, realizaram-se três ciclos de secagem e molhagem nas amostras iniciais a fim de obter uma média entre os valores encontrados para o peso seco e peso úmido para fibra não tratadas e tratadas.

O resultado final para o IA foi obtido através da Equação 1, na qual “P_{est}” representa o peso das fibras secas em estufa e “P_{um}” o peso úmido, após saturação, podendo assim verificar o quanto o tratamento utilizado influenciou na capacidade de absorção de água pelas fibras de sisal.

$$IA = \frac{P_{um} - P_{est}}{P_{est}} \quad \dots(1)$$

3.4 Análise da microestrutura

As avaliações de superfície foram efetuadas para as amostras de fibras não tratadas e tratadas superficialmente, por meio de microscópio metalográfico óptico modelo Kontrol – IM713, marca Fortel, mostrado na Figura 29, o qual é disponibilizado em laboratório na Universidade Federal do Pampa - Campus Alegrete.

Figura 29 – Microscópio óptico utilizado para análise microestrutural



Fonte: Elaboração própria

3.5 Ensaio de tração direta nas fibras

O ensaio de tração direta nas fibras foi executado em uma máquina de ensaios mecânicos Shimadzu, modelo AGS-X, como pode ser visualizado na Figura 30, utilizando uma célula de carga de 500 N.

Figura 30 – Máquina de ensaios mecânicos Shimadzu AGS-X



Fonte: Elaboração própria

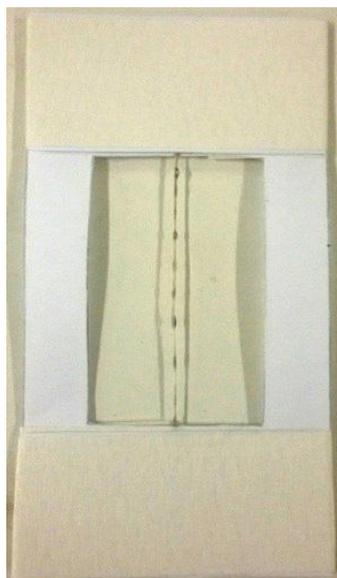
As fibras de sisal possuíam comprimento de 50 mm e foram ensaiadas em velocidade de 0,1 mm/min. Estas foram fixadas em molde de papel proporcionando seu alinhamento em relação à máquina e melhora da aderência entre a amostra e as garras que fazem o seu travamento, evitando assim provável escorregamento da amostra.

Para possibilitar a verificação e análise estatística da carga suportada pelas fibras submetidas à tração direta foram ensaiadas 20 amostras, sendo este total dividido igualmente entre: amostras para ensaio de tração direta, fibra de sisal sem tratamento (ATD-ST) e amostras para ensaio de tração direta, fibra de sisal submetida ao tratamento polimérico com SCA (ATD-PSCA).

As amostras de tração direta foram preparadas por adaptação do procedimento descrito na norma ASTM C1557, utilizando papel 90 g/m² e fita crepe, onde primeiramente faz-se o alinhamento da fibra no molde e em seguida, cola-se uma faixa de papel em suas extremidades para aprimorar a adesão das garras. Após o posicionamento do corpo de prova na máquina, será realizado o corte transversalmente nas laterais do molde para possibilitar que apenas a fibra seja tracionada.

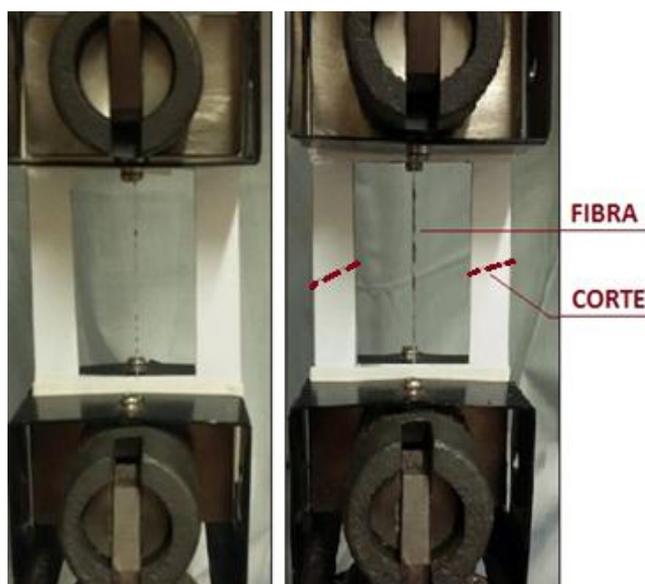
A Figura 31 mostra a amostra prepara para realização do ensaio de tração direta, enquanto a Figura 32 apresenta a configuração do ensaio.

Figura 31 – Molde utilizado para realização do ensaio de tração direta



Fonte: Elaboração própria

Figura 32 – Configuração do ensaio de tração direta na fibra de sisal tratada



Fonte: Elaboração própria

3.6 Matriz cimentícia

A matriz empregada para produção do compósito cimentício é uma adaptação de uma matriz já utilizada por Ferreira (2012). Esta adequação pode ser justificada pela mudança do tipo de cimento, optando-se fazer uso do cimento CP V-ARI ao invés do CP II F-32, de forma a coincidir com a disponibilidade local, facilitando a aquisição do material.

Desta maneira, estabeleceu-se o traço de materiais para produção da matriz consoante apresentado na Tabela 3, mantendo-se para este estudo a proporção usada por Ferreira (2012).

Tabela 3 – Consumo dos materiais utilizados na dosagem da matriz de cimento

Nome	CP	Areia	MC	Matriz (kg/m ³)			SP*	Espalhamento (mm)
				CV	Água	Relação a/c		
M1	362	542	289	434	434	0,4	25	≥450

*Sólidos de SP/MC

** a/c: água/material cimentício

Fonte: Adaptado de Ferreira (2012)

3.6.1 Produção da matriz

As argamassas foram preparadas seguindo a metodologia descrita pela NBR 7215 (ABNT, 1996), utilizando um misturador mecânico do tipo planetário, possuindo duas velocidades e capacidade aproximada de 5 litros, como exibido na Figura 33.

Figura 33 – Misturador mecânico do tipo planetário



Fonte: Elaboração própria

Realizou-se o processo de mistura conforme os passos elencados a seguir:

- mistura da água + superplastificante durante 30 segundos no misturador mecânico;

- mistura prévia (em recipiente separado) dos materiais finos por 1 minuto;
- adição da mistura dos materiais finos ao misturador ao longo de 2 minutos;
- mistura de todos os materiais colocados no misturador durante 2 minutos;
- parada de 30 segundos para retirada de material aderido as paredes do misturador;
- mistura por 2 minutos todo material contido no misturador.

Ainda, conforme a NBR 7215 (ABNT, 1996), após a mistura para obtenção da argamassa, realizou o ensaio de mesa de consistência, verificando a medida do diâmetro do espalhamento com auxílio de um paquímetro, com o intuito de avaliar se este se encontrava acima do limite apresentado na Tabela 3. A Figura 34 mostra de maneira simplificada as etapas do ensaio realizado.

Figura 34 – Etapas do ensaio de consistência: (a) preenchimento do tronco cônico; (b) retirada da fôrma verticalmente e (c) verificação da medida do espalhamento

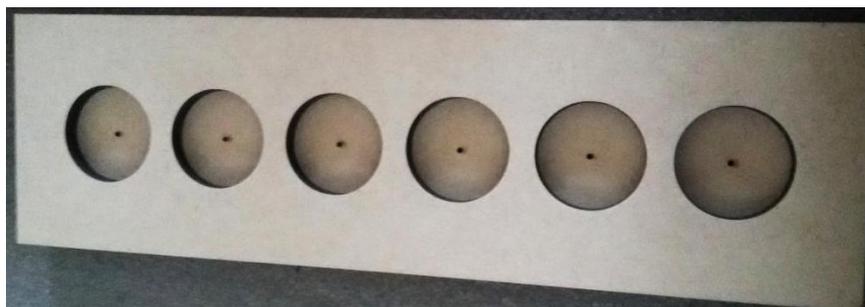


Fonte: Elaboração própria

3.7 Moldagem dos compósitos

Os corpos de prova para o ensaio de arrancamento foram moldados utilizando placas em MDF, como pode ser visto na Figura 35, tendo como base o método desenvolvido por Oliveira (2016).

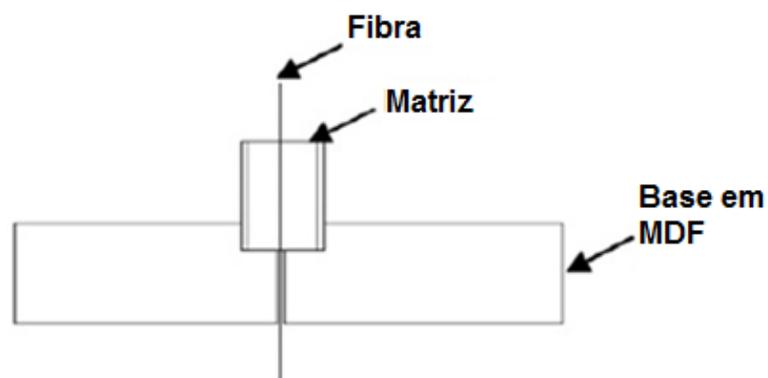
Figura 35 – Placa em MDF para encaixe dos tubos de PVC



Fonte: Elaboração própria

Estas placas foram fabricadas com rebaixo circular de 32 mm para possibilitar o encaixe do molde de PVC, possuindo furo central que visa garantir o alinhamento da fibra (SILVA et al., 2011) conforme mostra a Figura 36.

Figura 36 – Desenho esquemático mostrando o alinhamento da fibra



Fonte: Adaptado de Silva et al. (2011)

Primeiramente as fibras foram introduzidas e logo os moldes de PVC encaixados na placa de MDF. O lançamento da argamassa para moldagem dos corpos de prova consistiu em preencher os moldes manualmente com auxílio de saco de confeiteiro (FERREIRA, 2012), procedimento similar ao que pode ser verificado na Figura 37.

Figura 37 – Procedimento de moldagem dos corpos de prova para ensaio de arrancamento



Fonte: Elaboração própria

Posteriormente ao preenchimento dos moldes de PVC, realizou-se a sobreposição da placa de MDF sobre os moldes, como mostra a Figura 38, exercendo função de uma tampa superior. Após, a fibra foi esticada de forma a propiciar maior rigidez ao conjunto e possibilitar melhor alinhamento da fibra em meio a matriz.

Figura 38 – Encaixe superior das placas de MDF nos moldes de PVC



Fonte: Elaboração própria

3.8 Ensaio de arrancamento

O ensaio de arrancamento foi realizado em uma máquina de ensaios mecânicos Shimadzu AGS-X (Figura 30) com célula de carga de 500N, no qual os corpos de prova foram submetidos a ensaio em uma velocidade de deslocamento do travessão de 0,1 mm/min.

Os corpos de prova possuíam comprimento de embeбimento 50 mm de fibra de sisal no interior do compósito. Depois de 24 horas os compósitos foram desmoldados e levados a câmara úmida ($T \pm 23^{\circ}\text{C}$ e $UR \pm 43\%$) para cura, permanecendo nesta até 24 horas antes da idade de controle estipulada para o ensaio. Após a retirada dos corpos de prova da câmara úmida, estes foram mantidos por 24 horas em estufa a temperatura ambiente de $T = 23^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$, de modo a propiciar uma secagem adequada.

A Figura 39 mostra alguns dos corpos de prova utilizados para realização do ensaio de arrancamento.

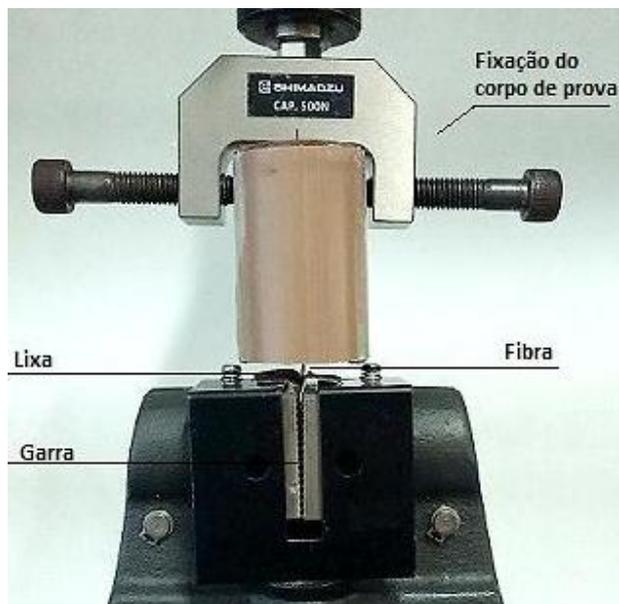
Figura 39 – Corpos de prova com embeбimento de 50 mm de fibra



Fonte: Elaboração própria

A Figura 40 apresenta a configuração do ensaio de arrancamento, onde é possível visualizar posicionamento alinhado da fibra com relação ao centro do molde de PVC.

Figura 40 – Configuração do ensaio de arrancamento para corpo de prova com 50 mm de embebimento



Fonte: Elaboração própria

Para viabilizar a posterior análise estatística dos resultados obtidos para o ensaio de arrancamento, moldaram-se um total de 40 amostras, sendo estas divididas igualmente em: corpos de prova de referência para ensaio de arrancamento, compósito reforçado com fibra de sisal sem tratamento (CPA-ST) e corpos de prova para ensaio de arrancamento, compósito reforçado com fibra de sisal submetida ao tratamento polimérico com SCA (CPA-PSCA). As amostras supracitadas foram ensaiadas nas idades de controle de 07 e 28 dias.

4. ANÁLISE DOS RESULTADOS

4.1 Avaliação da capacidade de absorção das fibras

Para a avaliação do índice de absorção de água das fibras obteve-se através da Equação 1 um IA de 84,67% para as fibra naturais de sisal e de 15,18% para as fibras submetidas ao tratamento polimérico à base de EPS e SCA. É possível notar que, após a aplicação do tratamento, a diminuição no índice de absorção das fibras é de cerca de 70%.

De forma semelhante, para fibras de sisal tratadas pelo processo de hornificação, Ferreira (2012) obteve uma diminuição de 30% na absorção de água pelas fibras. Brancato (2008), após aplicar tratamentos de ciclagens em fibras de celulose, observou diminuições de até 50% na capacidade de retenção de água das fibras. Ferreira et al. (2015) observaram diminuições de 15%, 17,50%, 25% e 50% para fibras de sisal tratadas, respectivamente, através de hornificação, tratamento alcalino com hidróxido de cálcio, a impregnação polimérica com estireno butadieno e tratamento híbrido, uma combinação entre tratamentos de hornificação e impregnação polimérica. Ainda, para fibras de eucalipto tratadas com tetraetilortossilicato (TEOS 98%), Tessaro et al. (2015) encontraram redução de 32% na absorção de água.

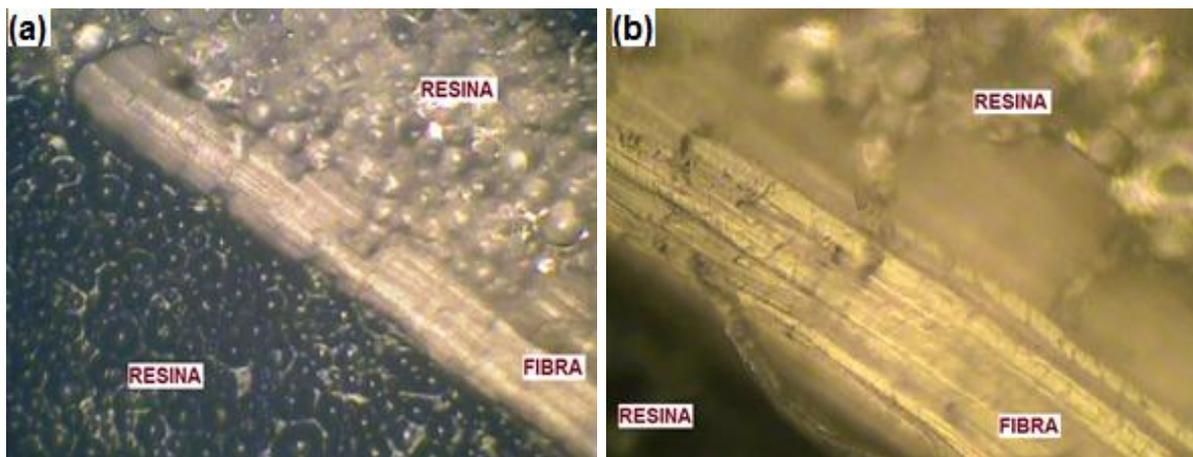
Com base na literatura, para outros tipos de tratamento em fibras naturais, esse comportamento pode ser explicado devido ao enrijecimento da estrutura das fibrocélulas do sisal, decorrente do processo de tratamento utilizado, possibilitando um maior empacotamento da estrutura interna da fibra.

No entanto, o comportamento de grande queda na absorção de água para o feixe de fibras que receberam tratamento também pode ser atribuído à escolha do polímero utilizado para aplicação do mesmo, visto que o poliestireno expandido constitui um composto apolar de natureza hidrofóbica, ou seja, este polímero caracteriza-se por possuir baixa ou nenhuma interação com água. Além disso, materiais hidrofóbicos tem a habilidade de realizar a formação de um filme sobre a superfície em contato, o que pode ter ocasionado um menor índice de absorção para fibras tratadas, pois este agiu repelindo as moléculas de água.

4.2 Análise microestrutural

Nas Figuras 41 e 42 são mostradas as características superficiais de fibras de sisal antes e após o tratamento com polímero EPS e SCA.

Figura 41 – Imagens de microscopia óptica da superfície de fibra de sisal não tratada: (a) ampliação 100x e (b) ampliação 200x



Fonte: Elaboração própria

Figura 42 – Imagens de microscopia óptica da superfície de fibra de sisal tratada quimicamente com EPS e SCA: (a) ampliação 100x e (b) ampliação 200x



Fonte: Elaboração própria

A partir das imagens obtidas para a superfície de fibras de sisal com auxílio de microscópio óptico, torna-se perceptível que o tratamento utilizado criou uma camada descontínua no envoltório longitudinal da fibra, ocasionando pontos de aglutinação da solução polimérica de EPS e SCA. A evaporação do solvente devido

ao elevado aumento da viscosidade da mistura quando exposta ao meio pode ser indicada como um dos fatores preponderantes para esse acontecimento.

Outro aspecto relevante é a possível falta de interação da fibra natural com o solvente utilizado (tolueno) para solubilização da mistura, ou ainda, com o polímero, uma vez que esse atuaria como o elemento de vinculação no quesito polímero-sílica-fibra. Assim, como tratamento empregado que consistiu na dissolução do polímero e da sílica no solvente supracitado, mostra-se como uma das causas prováveis da não uniformidade do tratamento, que este não tenha sido absorvido de maneira homogênea pelos poros da fibra, causando pontos de excesso.

Identifica-se que pode ter ocorrido efetividade do tratamento no que se refere à selagem da fibra, pois como pode ser observado na Figura 42 (b), há uma modificação da superfície das fibras ocasionada pelo tratamento, onde se observa o encapsulamento da fibra pela solução polimérica com SCA. No entanto, ao verificar as imagens de microscopia obtidas, nota-se que a utilização do tratamento parece configurar uma camada muito espessa, podendo influenciar negativamente na interação da fibra com matriz, porém, podendo ser efetiva ao analisar a fibra como um elemento único, no caso do ensaio de tração direta.

4.3 Tração direta das fibras

Na Tabela 4 são mostrados os dados obtidos para deslocamento e força médios, máximos e mínimos, desvio padrão e coeficiente de variação realizando a comparação entre 10 amostras de fibras de sisal sem tratamento e 10 amostras de fibras de sisal tratadas com EPS e SCA.

Tabela 4 – Ensaio de tração direta para ATD-ST e ATD-PSCA

	ATD-ST		ATD-PSCA	
	Deslocamento de Ruptura (mm)	Força de Ruptura (N)	Deslocamento de Ruptura (mm)	Força de Ruptura (N)
Média	2,800	10,109	2,198	10,705
Mínimo	0,973	5,151	1,199	7,515
Máximo	5,877	15,730	6,119	17,805
Desvio Padrão	1,929	4,149	1,484	3,032
Coef. Variação	68,89%	41,04%	67,53%	28,32%

Fonte: Elaboração própria

Visto que os resultados obtidos à tração direta para todas as amostras não tratadas e tratadas mostraram grande variabilidade, optou-se por realizar uma seleção dos dados de força e deslocamento, fazendo esta visualmente através da correlação entre aqueles que apresentavam forças de ruptura com menor variação. Dessa maneira verificou-se o deslocamento e força médios de ruptura, os quais são apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 – Deslocamentos e forças médios de ruptura para ATD-ST e ATD-PSCA

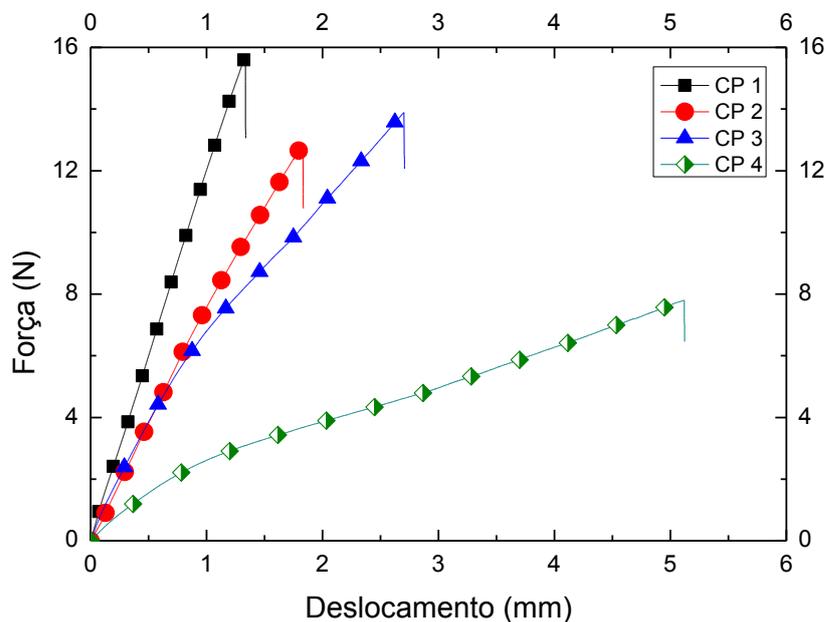
	ATD-ST		ATD-PSCA	
	Deslocamento de Ruptura (mm)	Força de Ruptura (N)	Deslocamento de Ruptura (mm)	Força de Ruptura (N)
Média	2,745	12,566	1,775	10,216
Desvio Padrão	1,677	3,395	0,675	1,836
Coef. Variação	61,11%	27,02%	38,02%	17,98%

Fonte: Elaboração própria

Analisando as médias obtidas, nota-se que o tratamento superficial não foi capaz de elevar as propriedades mecânicas, mantendo apenas os níveis normais aproximados quando comparado à força de ruptura suportada pela fibra de sisal apenas em estado natural. Ainda, verifica-se que os valores obtidos para aquelas sem tratamento encontram-se dentro da faixa encontrada por outros autores, tal como Ferreira (2012), que em seu estudo obteve para fibras naturais de sisal força de ruptura média de 10,28 N à tração direta.

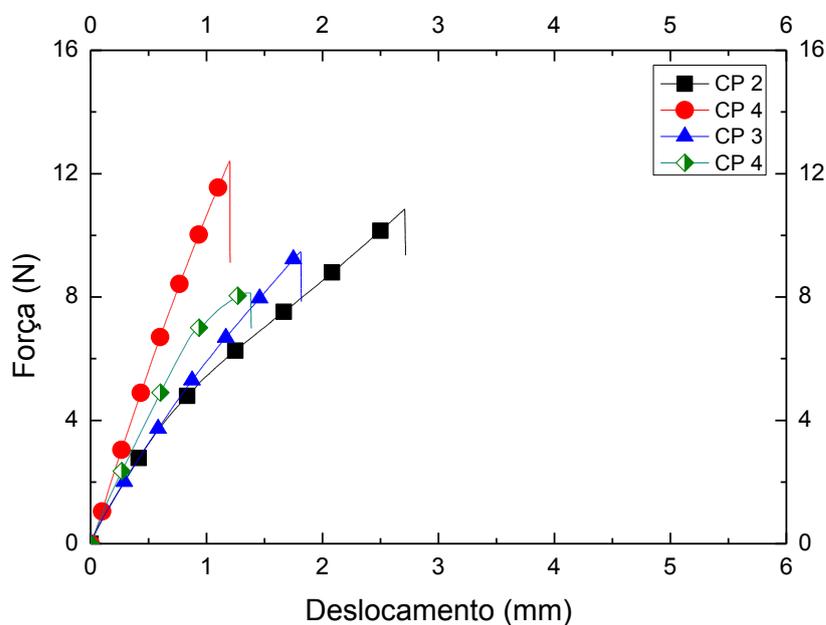
Nas Figuras 43 e 44, são apresentadas as curvas para as fibras de sisal em seu estado natural e para aquelas submetidas ao tratamento polimérico com EPS e SCA, respectivamente, para os resultados apresentados na Tabela 5.

Figura 43 – Curvas Força x Deslocamento para ATD-ST



Fonte: Elaboração própria

Figura 44 – Curvas Força x Deslocamento para ATD-PSCA



Fonte: Elaboração própria

Com base nas curvas apresentadas percebe-se que os níveis atingidos pela força de ruptura são variáveis, o que pode ser explicado pela irregularidade do diâmetro das fibras, pois segundo Silva (2009), as fibras de sisal dispõe de uma a

estrutura hierárquica com morfologia variável, possuindo seção transversal irregular. Assim, para que se obtenham resultados precisos quanto à resistência à tração direta e deformação, devem ser consideradas as áreas irregulares das fibras e calculada a tensão de ruptura.

Ressalta-se também que o tratamento não foi capaz de alterar significativamente as propriedades mecânicas da fibra de sisal, visto que força de ruptura não obteve acréscimo, apenas permanecendo estável. Esse fato pode ser explicado devido à variação da forma da seção transversal das fibras de sisal. No entanto, o tratamento polimérico combinado com adição de Sílica de Casca de Arroz pode ter sido suficiente para realizar a estabilização dimensional da fibra, como pode ser visualizado através da análise de imagens apresentada no item 4.2, onde se observa o encapsulamento da fibra pela solução polimérica de EPS e SCA.

Desse modo, mesmo buscando relacionar apenas os dados menos discrepantes para força de ruptura à tração direta, possibilita notar que há uma menor variação para a média de deslocamento e força de ruptura para àquelas que foram submetidas ao tratamento, mostrando que mesmo não tendo ocasionado aumento a força de tração, o tratamento utilizado proporcionou uma melhor homogeneidade na relação Força x Deslocamento. Essa afirmação torna-se perceptível ao realizar a análise gráfica da força de ruptura, contatando-se picos na força de ruptura à tração direta suportada pelas fibras naturais, o que se torna menos notável ao observar graficamente o comportamento das fibras tratadas, as quais mostram maior homogeneidade nos dados, pois possuem resultados mais próximos de força e deslocamento de ruptura.

4.4 Ensaio de arrancamento

Para os compósitos cimentícios reforçados com fibras de sisal não tratadas e tratadas com polímero EPS com SCA, verificou-se a força e deslocamento médios, mínimos e máximos de ruptura, desvio padrão e coeficiente de variação para todos os corpos de prova nas idades de controle de 7 e 28 dias.

A Tabela 6 apresenta os resultados obtidos para CPA-ST e CPA-PSCA na idade de controle de 7 dias, sendo que para sua obtenção foram analisados 10 corpos de prova para aqueles utilizando fibras naturais e 10 corpos de prova para os que utilizaram fibras submetidas ao tratamento.

Tabela 6 – Valor médio, mínimo e máximo, desvio padrão e coeficiente de variação da carga de ruptura, deslocamento para CPA-ST e CPA-PSCA com 50 mm de embebimento de fibra na idade de 7 dias

	CPA-ST		CPA-PSCA	
	Deslocamento de Ruptura (mm)	Força de Ruptura (N)	Deslocamento de Ruptura (mm)	Força de Ruptura (N)
Média	1,533	6,402	1,247	5,244
Mínimo	1,044	2,113	0,329	1,583
Máximo	2,890	10,158	2,685	14,632
Desvio Padrão	0,534	2,636	0,731	3,910
Coef. Variação	34,84%	41,17%	58,61%	74,56%

Fonte: Elaboração própria

Na Tabela 7 são apresentados os dados adquiridos através do ensaio de arrancamento para CPA-ST e CPA-PSCA na idade de controle de 28 dias, no qual o número de corpos de prova utilizados transcorreu igualmente ao mencionado para aqueles rompidos na idade de controle de 7 dias.

Tabela 7 – Valor médio, mínimo e máximo, desvio padrão e coeficiente de variação da carga de ruptura, deslocamento para CPA-ST e CPA-PSCA com 50 mm de embebimento de fibra na idade de 28 dias

	CPA-ST		CPA-PSCA	
	Deslocamento de Ruptura (mm)	Força de Ruptura (N)	Deslocamento de Ruptura (mm)	Força de Ruptura (N)
Média	1,330	7,729	0,962	5,731
Mínimo	0,445	2,183	0,179	2,080
Máximo	2,275	15,120	1,827	13,318
Desvio Padrão	0,693	4,514	0,623	3,388
Coef. Variação	52,10%	58,41%	64,81%	59,11%

Fonte: Elaboração própria

Comparando os resultados obtidos para os compósitos reforçados com fibras de sisal tratadas quimicamente pelo processo de imersão da fibra em solução polimérica de EPS com SCA com aqueles no qual foram utilizadas as fibras naturais com mesmo comprimento de embebimento, pode-se observar que a utilização do tratamento prejudicou o desempenho de aderência das fibras com a matriz, dado que a média da força de ruptura suportada pelos compósitos reforçados usando fibras de sisal em estado natural foi 18,09% e 25,85% maior aos 7 e 28 dias, respectivamente, em relação ao obtido para aquelas que utilizavam fibras tratadas.

Os desvios obtidos também apontam que o tratamento fez com que houvesse maior variabilidade nos resultados tanto para força quanto para o deslocamento de ruptura, o que pode ser justificado pela não uniformidade do processo utilizado para tratar as fibras. Esta afirmação é explicada através da análise de imagens microscópicas da superfície das fibras, no item 4.2, na qual pode ser visualizada a formação de uma película envoltória com camada irregular devido ao aumento da viscosidade da solução polimérica ao ser exposta a temperatura ambiente.

Visto isso, outro aspecto a ser considerado é a possível selagem da fibra devido ao tratamento utilizado, criando uma camada muito espessa do EPS combinado à SCA como mostram as imagens no item 4.2. Tal ocorrência pode ter promovido uma camada deslizante, originando pontos suscetíveis a perda de aderência da fibra com a matriz ao absorver a carga de arrancamento. Desse modo, a variação dimensional ocorrida pelo revestimento criado à fibra de sisal fez com que a capacidade transmissão de esforços fosse reduzida, enfraquecendo a ligação interfacial, formando assim uma interação fibra-polímero-matriz.

Foram selecionados dados que apresentavam menor variabilidade em relação à carga arrancamento suportada pelos compósitos, para assim possibilitar a realização da análise gráfica com um menor desvio padrão e coeficiente de variação.

Dessa forma, nas Tabelas 8 e 9 são mostrados os dados de força e deslocamento médio de ruptura, desvio padrão e coeficiente de variação para 4 dos corpos de prova em que se obteve resultados mais próximos ao relacionar força e deslocamento de ruptura para CPA-ST e CPA-PSCA submetidos ao ensaio de arrancamento na idade de controle de 7 e 28 dias, respectivamente.

Tabela 8 – Valor médio, desvio padrão e coeficiente de variação da carga de ruptura e deslocamento para CPA-ST (CP 2, CP 4, CP 8 e CP 10) e CPA-PSCA (CP 2, CP 5, CP 6 e CP 10) com 50 mm de embebição de fibra aos 7 dias

	CPA-ST		CPA-PSCA	
	Deslocamento de Ruptura (mm)	Força de Ruptura (N)	Deslocamento de Ruptura (mm)	Força de Ruptura (N)
Média	1,302	8,784	1,113	6,008
Desvio Padrão	0,193	1,180	0,353	2,082
Coef. Variação	14,85%	13,44%	31,71%	34,65%

Fonte: Elaboração própria

Tabela 9 - Valor médio, desvio padrão e coeficiente de variação da carga de ruptura e deslocamento para CPA-ST (CP 2, CP 4, CP 8 e CP 10) e CPA-PSCA (CP 2, CP 5, CP 8 e CP 9) com 50 mm de embebição de fibra aos 28 dias

	CPA-ST		CPA-PSCA	
	Deslocamento de Ruptura (mm)	Força de Ruptura (N)	Deslocamento de Ruptura (mm)	Força de Ruptura (N)
Média	1,147	12,205	1,343	8,798
Desvio Padrão	0,509	3,357	0,486	3,087
Coef. Variação	44,37%	27,50%	36,20%	35,09%

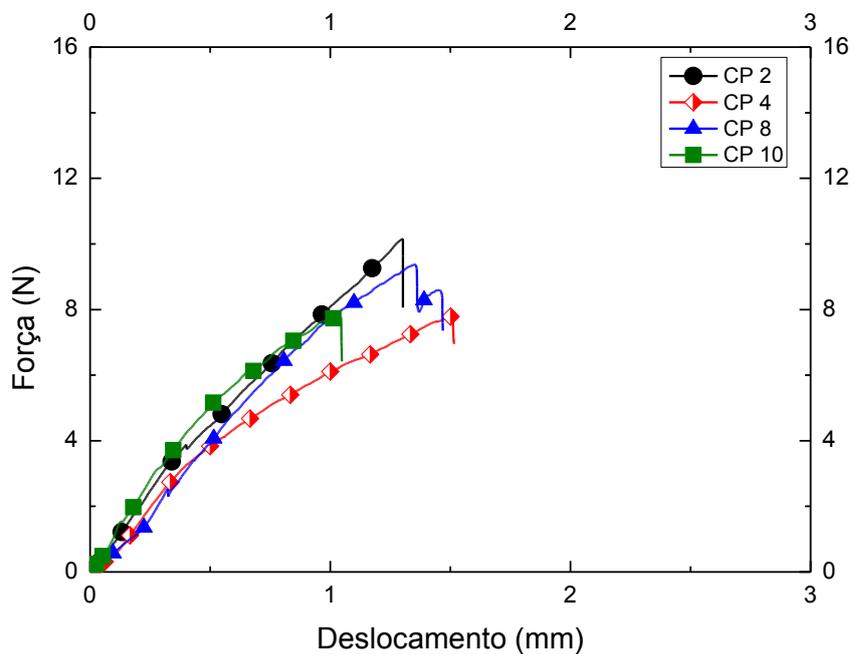
Fonte: Elaboração própria

Nota-se que mesmo tentando utilizar apenas os compósitos que obtiveram comportamento próximo quanto a força de ruptura, há um decréscimo na variação dos dados tanto aos 7 quanto ao 28 dias, podendo ser esse fato explicado pela inconstância da seção transversal das fibras de sisal, não somente pela irregularidade do tratamento proposto.

A relação entre as forças de ruptura obtidas para os corpos de prova ensaiados na idade de 7 dias não obteve variação significativa, de modo que essas mantiveram uma média similar. Contudo, na idade 28 dias, mesmo ao observar dados relacionados conforme sua proximidade, ainda há um decréscimo no que tange à carga de ruptura suportada pelos compósitos, apresentando para as fibras não tratadas uma média 27,91% maior no desempenho de aderência ao relacionar com os compósitos que utilizaram fibra tratadas.

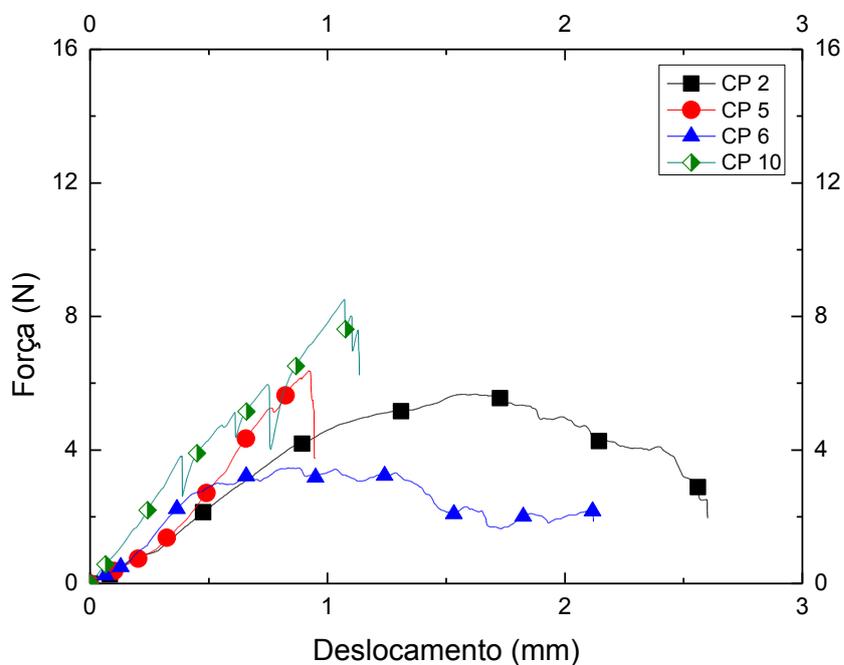
As Figuras 45 e 46 apresentam as curvas Força x Deslocamento obtidas através para os ensaios de arrancamento aos 7 dias para os compósitos reforçados com fibras de sisal sem tratamento e tratadas utilizando os dados previamente selecionados por proximidade dos resultados.

Figura 45 – Curvas Força x Deslocamento para ensaio de arrancamento em CPA-ST aos 7 dias



Fonte: Elaboração própria

Figura 46 – Curvas Força x Deslocamento para ensaio de arrancamento em CPA-PSCA aos 7 dias



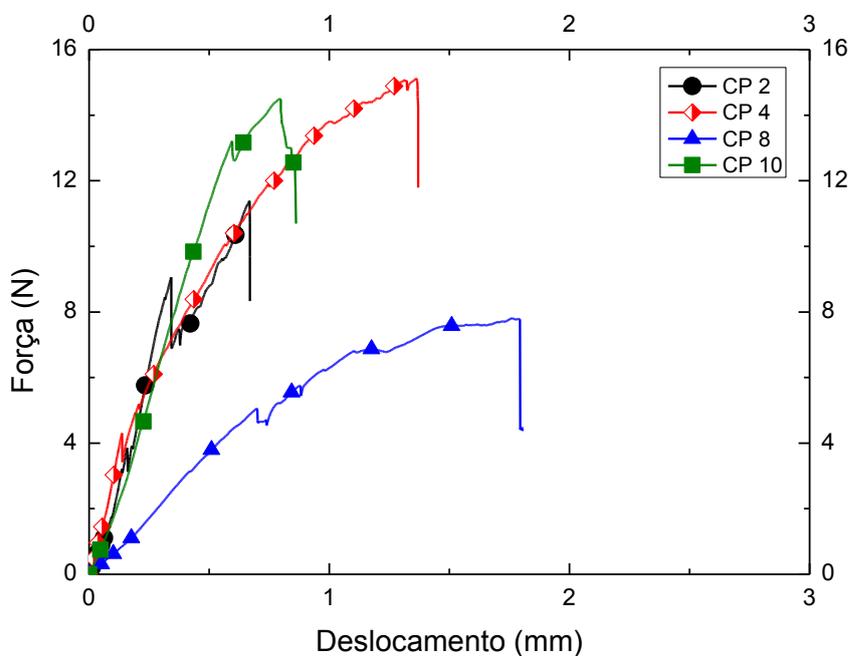
Fonte: Elaboração própria

Assim, ao observar as Figuras 45 e 46, para os resultados do ensaio de arrancamento, nota-se que apesar de apresentar uma força de ruptura menor, os

compósitos em que foram utilizadas as fibras tratadas apresentam picos de força ao longo do deslocamento, significando pontos onde foi possível obter uma melhor interação de aderência entre fibra-polímero-matriz e, também, é perceptível que antes de chegar à ruptura os níveis de força resistente oscilam e não sofrem ruptura frágil como mostrado para aqueles compósitos usado com fibras naturais.

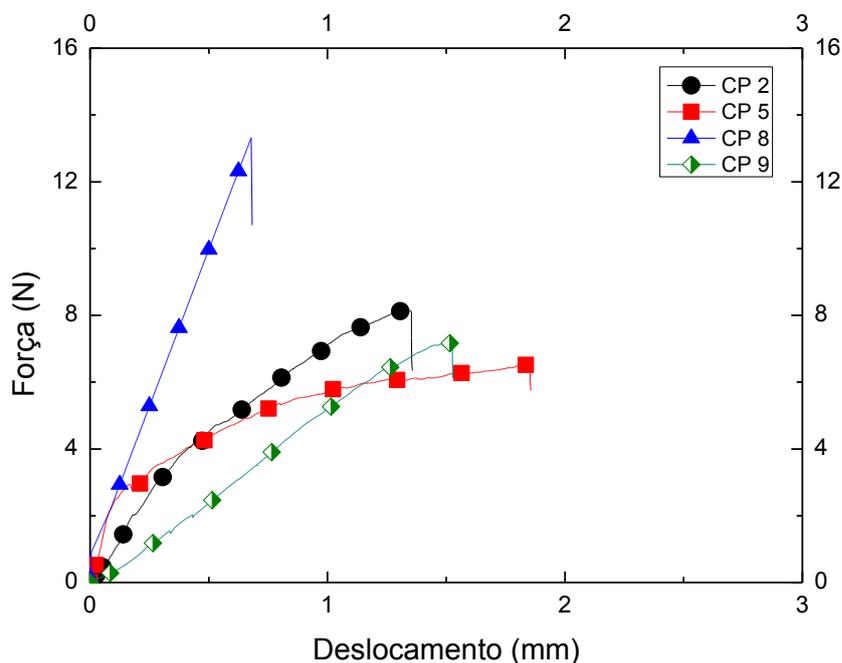
As curvas de carga x deslocamento para os compósitos reforçados com fibras tratadas e não tratadas ensaiados ao arrancamento com idade de 28 dias para os dados selecionados são mostradas nas Figuras 47 e 48.

Figura 47 – Curvas Força x Deslocamento para ensaio de arrancamento em CPA-ST aos 28 dias



Fonte: Elaboração própria

Figura 48 – Curvas Força x Deslocamento para ensaio de arrancamento em CPA-PSCA aos 28 dias



Fonte: Elaboração própria

Desse modo, ao analisar os níveis de força obtidos para as fibras tratada percebe-se que esse tratamento prejudicou a interação da fibra com a matriz cimentícia em ambas as idades de ruptura, ocasionando uma interação entre fibra-polímero-matriz. Como justificativa para tal ocorrência aponta-se a possibilidade de, por se tratar de um tratamento polimérico com polímero hidrofóbico que cria uma camada de selagem à fibra repelindo moléculas de água, o tratamento proposto pode não ter permitido que a pasta penetrasse nos poros da fibra, e como consequência ocasionou a diminuição da aderência.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente estudo objetivou estudar a influência de tratamento polimérico com EPS e SCA em fibras de sisal de modo a avaliar a capacidade de absorção, verificação através de imagens de modificações na superfície das fibras após o tratamento, avaliação do comportamento à tração direta realizando um comparativo entre as fibras de sisal tratadas com fibras de sisal em estado natural e, ainda, analisar o comportamento aderente das fibras de sisal quando usadas para reforços matrizes à base de cimento Portland, verificando a ligação aderência na interface fibra-matriz, realizando um comparativo entre os compósitos utilizando fibras naturais e tratadas.

Desse modo, no que se refere à capacidade absorção de água nota-se que as fibras tratadas com polímero EPS e SCA obtiveram um índice menor que aquelas em estado natural. Conforme encontrado na literatura, isso pode ter ocorrido devido à diminuição do índice que os vazios capilares da fibra, os quais possivelmente foram fechados de forma progressiva a partir da aplicação do tratamento e não conseguem mais ser completamente reabertos pelo processo de reumidificação. Entretanto, tal fato pode ter ocorrido também em virtude da natureza hidrofóbica do polímero empregado no tratamento das fibras, visto que esse tipo material age repelindo as moléculas de água, em decorrência de não possuírem interação com a mesma.

Ao analisar a microestrutura de superfície das fibras de sisal verificou-se que ocorreu a selagem da fibra através do tratamento, entretanto, também são observados pontos de aglutinação deste ao longo da fibra. Nota-se ainda que a utilização do tratamento com EPS e SCA pode ter proporcionado, devido à viscosidade da solução, uma camada de proteção muito espessa, pode ter causado efeitos negativos na interação da fibra com a matriz, porém, proporcionando melhor homogeneidade ao analisar as fibras tratadas como elemento único, como quando solicitadas à tração direta.

Com base nos resultados analisados para o ensaio de tração direta observa-se que há uma grande divergência relação à capacidade resistente das fibras naturais e para aquelas submetidas ao tratamento. No entanto, como não foram realizadas as verificações dos diâmetros para obtenção da tensão de ruptura, não foi possível avaliar o quanto a inconstância nos diâmetros das fibras influenciou para a variação dos resultados e, com isso, dificultou a atribuição de um padrão de

amostragem dimensional, o que torna justificável a diversificação dos dados obtidos para forças máximas, médias e mínimas.

À vista da capacidade de aderência da fibra com a matriz cimentícia, constata-se que este tratamento não foi suficiente para promover um aumento de aderência na interface fibra-matriz, criando uma interface distinta de interação de fibra-polímero-matriz. Bem como não ocorreu através deste a modificação da morfologia da fibra de sisal, o que ocasionaria a reformação das deformações nas paredes de suas fibrocélulas, possibilitando em uma menor variabilidade na carga suportada pelas fibras quando submetidas ao ensaio de arrancamento. Um aspecto relevante que pode ser indicado como um possível fator de diminuição da capacidade de ancoragem da fibra na matriz de cimento baseia-se no fato de que o método e materiais empregados para promover o tratamento nas fibras de sisal podem ter proporcionado desconformidades ao longo da superfície da fibra sisal, visto que o solvente utilizado é de fácil evaporação e isso faz com que o EPS tenha sua viscosidade aumentada rapidamente. O aumento da viscosidade resulta em uma camada de tratamento muito espessa a fibra, gerando a não ocorrência de aderência por interface fibra-matriz, criando, como já mencionado, uma interface aderente entre fibra-polímero-matriz. Assim, por consequência, ocorre uma maior variabilidade nos resultados encontrados ao analisar relação de aderência através do ensaio de arrancamento das fibras no compósito.

Portanto, a possibilidade de ter se obtido uma película muito espessa formada a partir do tratamento polimérico mostra-se como um dos fatores preponderantes para justificar perda de aderência no compósito cimentício, o qual poder ter agido bloqueando a interação entre a matriz cimentícia e a fibra, criando pontos frágeis ao longo do comprimento de embebedimento do compósito.

Logo, avalia-se que o tratamento proposto para uniformizar a estrutura da fibra e melhorar a sua capacidade mecânica de tração e aderência não foi efetivo. Todavia, a partir da ineficácia do tratamento químico apresentado, faz-se necessário analisar alternativas de tratamentos químicos e/ou físicos para modificar as propriedades mecânicas das fibras ou ainda, explorar a combinação do tratamento polimérico com adição de Sílica de Casca de Arroz a outro tratamento já estudado.

Sugestões para trabalhos futuros

Para que fosse possível avaliar da melhor forma o comportamento de aderência, faz-se necessário realizar testes levando em consideração a variação entre os diâmetros das fibras com relação à carga por elas suportada.

Realizar análises de tratamentos poliméricos em paralelo com branqueamento da fibra por ataque alcalino, visando melhorar a molhabilidade da fibra e proporcionar uma aderência mais uniforme do polímero à fibra.

Avaliar a utilização de outros tipos de polímeros aglomerantes e solventes que possibilitem melhor interação com a fibra de sisal.

Avaliar a utilização de outro tipo de adição, como por exemplo, a Sílica 325, areia fina, a fim de verificar sua interação com a fibra e promoção de uma melhor aderência fibra-matriz.

REFERÊNCIAS

AGOPYAN, V.; SAVASTANO JUNIOR, H. Fibras vegetais como materiais de construção. **Materiais de construção civil e princípios de ciência e engenharia de materiais**, São Paulo, v. 2, p. 1539-1558, 2007.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C-1557**: Standard Test Method for Tensile Strength and Young's Modulus of Fibers. Pensilvânia, USA, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7215**: Cimento Portland – Determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro, 1996.

BENTUR, A.; MINDESS, S. **Fibre Reinforced Cementitious Composites**. 2 Ed. New York: Taylor & Francis Group, 2007.

BRANCATO, A. A. **Effect of progressive recycling on cellulose fiber surface properties**. 2008. 122 p. Thesis (Doctor of Philosophy), School of Chemical and Biomolecular Engineering - Georgia Institute of Technology, Georgia, 2008.

DA GLORIA, M. Y. R. **Desenvolvimento e caracterização de painéis sanduíches de concreto com núcleo leve e faces em laminados reforçados com fibras longas de sisal**. 2015. 115 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2015.

DEFOIRDT, N. et al. Assessment of the tensile properties of coir, bamboo and jute fibre. **Composites Part A: applied science and manufacturing**, v. 41, p. 588–595, 2010.

FERNANDES, J. R. et al. Nanopartículas de sílica silanizada como compatibilizante em compósitos de fibras de sisal/polietileno. **Revista Polímeros**, v. 27, p. 61-69, 2017.

FERREIRA, S. R. **Influência da hornificação na aderência fibra-matriz e no comportamento de compósitos cimentícios reforçados com fibras curtas de sisal**. 2012. 131 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) - Universidade Estadual de Feira de Santana, Feira de Santana, 2012.

FERREIRA, S. R. et al. Influência de ciclos molhagem-secagem em fibras de sisal sobre a aderência com matrizes de cimento Portland. **Revista Matéria**, v. 17, p. 1024-1034, 2012.

FERREIRA, S. R. et al. Effect of fiber treatments on the sisal fiber properties and fiber–matrix bond in cement based systems. **Construction and Building Materials**, v. 101, p. 730-740, 2015.

FERREIRA, S. R. **Effect of surface treatments on the structure, mechanical, durability and bond behavior of vegetable fibers for cementitious composites**. 2016. 230 p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2016.

FERREIRA, S. R. et al. Inverse identification of the bond behavior for jute fibers in cementitious matrix. **Composites Part B**, v. 95, p. 440-452, 2016.

FERREIRA, S. R. et al. Effect of hornification on the structure, tensile behavior and fiber matrix bond of sisal, jute and curauá fiber cement based composite systems. **Construction and Building Materials**, v. 139, p. 551-561, 2017.

FIDELIS, M. E. A. **Desenvolvimento e caracterização mecânica de compósitos cimentícios têxteis reforçados com fibras de juta**. 2014. 266 p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2014.

GRAM, H.E. **Durability of natural fibres in concrete**. Stockolm: Swedish Cement and Concrete Research Institute, 1983.

GONÇALVES, J. P. et al. Penetração de água em argamassas de argila calcinada-cimento Portland. **V Simpósio Brasileiro de Tecnologia em Argamassas: Argamassas para o Futuro**, São Paulo, v. 11, p. 399-410, 2003.

LI, Y.; MAI, Y. W.; YE, L. Sisal fibre and its composites: a review of recent developments. **Composites Science and Technology**, v. 60, p. 2037-2055, 2000.

LI, Y.; HU, C.; YU, Y. Interfacial studies of sisal fiber reinforced high density polyethylene (HDPE) composites. **Composites Part A: applied science and manufacturing**, v. 39, p. 570-578, 2008.

LIMA, P. R. L. **Análise teórica e experimental de compósitos reforçados com fibras de sisal**. 2004. 263 p. Tese (Doutorado em Ciências em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2004.

LIMA, P. R. L.; TOLEDO FILHO, R. D. Uso de metacaulinita para incremento da durabilidade de compósitos à base de cimento reforçados com fibras de sisal. **Ambiente Construído**, v. 8, p. 7-19, 2008.

MELO FILHO, J. A. **Desenvolvimento e caracterização de laminados cimentícios reforçados com fibras longas de sisal**. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2005.

MELO FILHO, J.A. **Durabilidade química e térmica e comportamento mecânico de compósitos de alto desempenho reforçados com fibras de sisal**. 2012. 184 p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2012.

MELO FILHO, J. A.; SILVA, F. A.; TOLEDO FILHO, R. D. Degradation kinetics and aging mechanisms on sisal fiber cement composite systems. **Cement and Concrete Composites**, v. 40, p. 30-39, 2013.

MENDES, G. G. **Durabilidade de concretos com adição de sílica da casca de arroz à penetração de íons cloretos**. 2014. 53 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Pampa, Alegrete. 2014.

MWAIKAMBO L.Y.; ANSELL M.P. Chemical modification of hemp, sisal, jute, and kapok fibres by alkalization. **Journal of applied polymer science**, v. 84, p.2222-2234, 2002.

OLIVEIRA, L. L. **Estudo da fibra natural do capim Annoni como elemento de reforço em matriz cimentícia**. 2016. 80 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Pampa, Alegrete, 2016.

PEREIRA, T. V. C. et al. Investigação da influência morfológica via análise de imagens na resistência à tração de fibras naturais. **67º congresso ABM**, Rio de Janeiro, p. 4172-4184, 2012.

ROCA BRUNO, L. E. **Preparação de ionômeros e estudo da Influência do emprego de ionômeros na tenacificação da Poliamida 6**. 1996. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia dos Materiais) - Universidade Federal de São Carlos, São Paulo, 1996.

SANTOS, R. D. et al. Influência da síntese de nanopartículas de manganês e ferro na microestrutura, resistência à tração e na aderência de fibras de curauá e sisal

com matriz à base de cimento. **57° Congresso Brasileiro de Concreto**, Bonito, 2015.

SANTOS, R. D. **Estudo da influência de tratamentos na promoção da durabilidade e aderência de fibras de curauá e sisal em matrizes à base de cimento Portland**. 2016. 128 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2016.

SILVA, F. A. **Durabilidade e propriedades mecânicas de compósitos cimentícios reforçados por fibras de sisal**. 2009. 243 p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009.

SILVA, F. A. et al. Effect of fiber shape and morphology on interfacial bond and cracking behaviors of sisal fiber cement based composites. **Cement and Concrete Composites**, v. 33, p. 814-823, 2011.

TESSARO, A. B. et al. Compósitos cimentícios reforçados com fibras de eucalipto puras e tratadas com tetraetilortossilicato (TEOS 98%). **Ambiente Construído**, v. 15, n. 3, p. 47-55, 2015.

TOLEDO FILHO, R. D. **Materiais compósitos reforçados com fibras naturais: caracterização experimental**. 1997. 472 p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1997.

TOLEDO FILHO, R. D. et al. Development of vegetable fibre–mortar composites of improved durability. **Cement and Concrete Composites**, v. 25, p. 185-196, 2003.

TOLEDO FILHO, R. D. et al. Durability of compression molded sisal fiber reinforced mortar laminates. **Construction and Building Materials**, v. 23, p. 2409-2420, 2009.

TOMCZAK, F. **Estudo sobre a estrutura e propriedades de fibras de coco e curauá do Brasil**. 2010. 135 p. Tese (Doutorado em Engenharia e Ciência dos Materiais) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2010.

WEI, J; MEYER, C. Degradation mechanisms of natural fiber in the matrix of cement composites. **Cement and Concrete Research**, v. 73, p. 1-16, 2015.

YAN, L. et al. Effect of alkali treatment on microstructure and mechanical properties of coir fibres, coir fibre reinforced-polymer composites and reinforced-cementitious composites. **Construction and Building Materials**, v. 112, p. 168-182, 2016.