

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA

JACSON SOARES OLIVEIRA

**AVALIAÇÃO DO TRATAMENTO DE FIBRAS CURTAS DE SISAL EM MATRIZ
CIMENTÍCIA**

**Alegrete-RS
2023**

JACSON SOARES OLIVEIRA

**AVALIAÇÃO DO TRATAMENTO DE FIBRAS CURTAS DE SISAL EM MATRIZ
CIMENTÍCIA**

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. Fernanda Bianchi Pereira da Costa

**Alegrete-RS
2023**

JACSON SOARES OLIVEIRA

AVALIAÇÃO DO TRATAMENTO DE FIBRAS CURTAS DE SISAL EM MATRIZ CIMENTÍCIA

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: 26 de janeiro de 2023.

Banca examinadora:

Profa. Dra. FERNANDA BIANCHI PEREIRA DA COSTA - UNIPAMPA - Orientadora

Profa. Dra. SIMONE DORNELLES VENQUIARUTO - UNIPAMPA

Eng. Me. KEVIN JHONEOR REBOLLEDO LA TORRE - Membro externo



Assinado eletronicamente por **SIMONE DORNELLES VENQUIARUTO, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 03/02/2023, às 19:24, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **Kevin Jhoneor Rebolledo La Torre, Usuário Externo**, em 06/02/2023, às 17:52, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **FERNANDA BIANCHI PEREIRA DA COSTA, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 07/02/2023, às 09:39, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.unipampa.edu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **1047150** e o código CRC **19EF5A3A**.

AGRADECIMENTO

Gostaria de agradecer nesse momento de minha vida a Deus, que tem me concebido nesses dias de vida muita glória e aprovação.

A minha família que esta ou meu lado sempre, e em qualquer situação, especialmente minha mãe, Ana Lúcia que em suas santas orações tem colocado meu nome para alcançar os meus objetivos, ao meu pai que lutou com bravura mediante as dificuldades para que eu possa alcançar a graça máxima da educação longe de casa. Meu irmão que me deste apoio moralmente para poder está neste momento.

Um carinho especial a minha noiva e futura mulher pelo carinho transmitido á mim nesses períodos tão difíceis, ter suportado a angustia que é estar juntos, mas morando distante um do outro.

A minha orientadora Fernanda, pelo apoio incondicional e acadêmico, terá minha gratidão eterna. Obrigado pelos momentos de aprendizado, pela paciência em me conceder as explicações mais simples e pela dedicação ao meu trabalho como um todo.

Aos meus amigos Joyce Correia, Alex Tomaz, Alan Cabral, Alexander Ian, Matias de Paula, Lucas Pedroso, Thiago Dutra, Ian Mota, e Marcos Rodrigues que na minha graduação sempre estiveram dispostos a me ajuda e compreender as dificuldades da graduação. Meus caros amigos vocês são formidáveis.

Gostaria de agradecer a UNIPAMPA como um todo, pela oportunidade de ter vivenciada nessa jornada acadêmica.

Aos demais colegas e professores do curso que partilharam de seu conhecimento nessa jornada, sintam-se agradecidos por contribuir com a minha formação.

RESUMO

Atualmente existem diferentes soluções e tecnologias para a introdução de material fibroso em concretos, de modo a sanar a deficiência que esse material apresenta sob esforço de tração. As alternativas estão ligadas a introdução de um reforço que promova diminuição da propagação de fissura, tais como armadura de aço, ou fibras sintéticas e naturais. Tendo em vista essa necessidade, o presente trabalho busca uma alternativa sustentável através do uso da fibra de sisal, adicionada como reforço na matriz de concreto. No entanto, as fibras naturais estão sujeitas a degradação no meio alcalino das matrizes de cimento, o que acarreta na perda de sua eficiência. Neste sentido, este trabalho visa estudar o comportamento do concreto reforçado com fibras curtas de sisal, impregnadas com soluções aquosas de lignosulfonato com teores de 4%. Para tanto, foram estudadas três diferentes misturas de concreto, sendo: (i) mistura de referência (LI-REF), com fibras tratadas apenas com lignosulfonato; (ii) mistura com fibras tratadas com lignosulfonato mais a cinza de casca de arroz (LI-CCA); e (iii) mistura com fibras tratadas com lignosulfonato e substituição parcial do cimento Portland por cinza de casca de arroz (LI+MCCA). Os concretos foram testados aos 14 e 28 dias, sendo analisado seu comportamento à tração na flexão, compressão axial e absorção de água por capilaridade. Através de análise com microscópio eletrônico de varredura (MEV), verificou-se que o lignosulfonato ficou aderido à fibra. No entanto, não houve mudança nos resultados de tração e capacidade de absorção das fibras em função dos tratamentos. A partir dos ensaios de compressão e tração na flexão dos compósitos, observou-se que houve perda de resistência de 14 para 28 dias, exceto para a matriz com substituição parcial do cimento, quem não sofreu alterações entre as idades analisadas. Não houve redução da absorção de água por capilaridade dos compósitos contendo cinza da casca de arroz. Em suma, a adição das fibras apresentou melhoras nos níveis de tenacidade da matriz do concreto, onde o compósito foi capaz de se deformar após a abertura da primeira fissura. Estudos de novos tratamentos e idades mais avançadas são recomendados para certificação do desempenho da fibra em matrizes cimentícias.

Palavras-Chave: fibra de sisal; lignosulfonato de sódio; cinza de casca de arroz; tração direta; tração na flexão de quatro pontos.

ABSTRACT

Currently there are different solutions and technologies for the introduction of fibrous material in concrete, in order to health the deficiency that this material presents under tensile stress. The alternatives are linked to the introduction of a reinforcement that promotes decreased crack propagation, such as steel reinforcement, or synthetic and natural fibers. In view of this need, the present work seeks a sustainable alternative through the use of sisal fiber, added as reinforcement in the concrete matrix. However, natural fibers are subject to degradation in the alkaline medium of cement matrices, which results in the loss of their efficiency. In this sense, this work aims to study the behavior of concrete reinforced with short sisal fibers, impregnated with aqueous lignosulfonath solutions with 4% contents. For this, three different concrete mixtures were studied: (i) reference mixture (LI-REF), with fibers treated only with lignosulfonath; (ii) mixture with fibers treated with lignosulfonate plus rice husk ash (LI-CCA); and (iii) mixture with fibers treated with lignosulfonato and partial replacement of Portland cement by rice husk ash (LI+MCCA). The concretes were tested at 14 and 28 days, and their traction behavior in flexion, axial compression and water absorption by capillarity was analyzed. Through analysis with electronic microscopic scanning (MEV), it was verified that lignosulfonate was adhered to the fiber. However, there was no change in tensile results and fiber absorption capacity as a function of treatments. From the compression and traction tests in the flexion of the composites, it was observed that there was a loss of resistance from 14 to 28 days, except for the matrix with partial cement replacement, who did not suffer alterations between the ages analyzed. There was no reduction in water absorption by capillarity of composites containing rice husk ash. In short, the addition of the fibers showed improvement in the levels of tenacity of the concrete matrix, where the composite was able to deform after the opening of the first fissure. Studies of new treatments and older ages are recommended for certification of fiber performance in cementitious matrices.

Keywords: sisal fiber; sodium lignosulfonate; rice husk ash; direct traction; traction in four-point flexion.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Classificação dos compósitos segundo os grupos e subgrupos.	11
Figura 2 – Representação esquemática, orientação e distribuição da fibra	12
Figura 3 – Linhas de tensões no compósito (a); e distribuição das tensões de cisalhamento na interface fibra-matriz (b)	15
Figura 4 – Representação das tensões tangenciais de cisalhamento na interface da fibra-matriz	16
Figura 5 – Compósito reforçado com fibra (VF); curva (A) abaixo do volume crítico; curva (B) acima do volume crítico; (C) volume crítico do material.....	17
Figura 6 – Detalhe: (a) planta do sisal, (b) após a colheita, (c) secagem das fibras.	18
Figura 7 – O primeiro passo do desfibramento na folha do sisal.....	19
Figura 8 – Desenho esquemático da célula individual de fibra de sisal	19
Figura 9 – Micrografias das fibras de (a) sisal; (b) caraúva; (c) juta; (d) piaçava;(e) coco.....	21
Figura 10 – Microestrutura da fibra em natura (a), (b); fibra retirada de uma amostra com idade de 5 anos (c), (d).....	26
Figura 11 – Curvas carga-deflexão de compósitos reforçados com sisal.	27
Figura 12 – Curvas tensão deformação específica do compósito, (A) aos 28 dias; (B) 28 dias em banho térmico.	28
Figura 13 – Organograma para realização da pesquisa	30
Figura 14 – Curva granulométrica do agregado miúdo (areia)	32
Figura 15 – Curva granulométrica dos agregados graúdos	34
Figura 16 – Fibras Utilizadas na mistura	36
Figura 17 – Fibras em tratamento em solução com lignosulfonato (a) e lignosulfonato e cinza da casca de arroz (b).	36
Figura 18 – Máquina de ensaio Shimadzu modelo AGS X	37
Figura 19 – Filamento de fibra após o ensaio de tração	38
Figura 20 – Ensaio de tração nas fibras.....	39
Figura 21 – Valores de absorção de água pelas fibras	42
Figura 22 – Análises microscópica das fibras de sisal tratadas e sem tratamento....	43
Figura 23 – Ensaio mecânicos nos corpos de prova de concreto.	49
Figura 24 – Índice de absorção médio de água em função do tempo.....	50
Figura 25 – Resistência média à compressão pela idade de ensaio.....	52
Figura 26 – Resistência média à tração na flexão pela idade de ensaio.....	54
Figura 27 – Curva carga (kN) versus deslocamento (mm) obtidas aos 28 dias.	55

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Resultados de comportamento mecânico, morfologia e composição química das fibras de juta, sisal e curauá	20
Tabela 2 Composição química do lignosulfonato de acordo como fabricante	31
Tabela 3 – Caraterização do agregado miúdo (areia)	32
Tabela 4 – Caraterização do agregado Graúdo Brita 0	33
Tabela 5 – Caraterização do agregado Graúdo Brita 1	33
Tabela 6 – Valores médios do ensaio de tração direta nas fibras tratadas e sem tratamento	38
Tabela 7 – Valores médios corrigidos para o ensaio de tração na fibra com e sem tratamento algum	39
Tabela 8 – Valores médios de absorção de água pelas fibras	42
Tabela 9 – Traço unitário disponibilizado para a dosagem do estudo.....	46
Tabela 10 – Quantitativo de material para 1m ³ de concreto.....	46
Tabela 11– Descrição da metodologia e ensaios.....	48
Tabela 12 – Análise de variância para o ensaio de capilaridade na idade de 72 horas	51
Tabela 13 – Análise de estatística ANOVA para os ensaios de compressão uniaxial	53
Tabela 14 – Análise de variância ANOVA para o ensaio de tração na flexão de quatro pontos	55
Tabela 15 – Comparação entre valores obtidos na curva carga <i>versus</i> deslocamento.	56

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	7
1.1 Contextualização do tema e justificativa.....	7
1.2 Objetivo Geral.....	9
1.3 Objetivo Específico	9
2 CONCEITOS GERAIS E REVISÃO DE LITERATURA	10
2.1 Compósitos.....	10
2.2 Interação Fibra-matriz.....	14
2.2.1 Fibra de Sisal	17
2.3 Proteção da fibra em meio alcalino	22
2.3.1 Tratamento superficial da fibra	22
2.3.2 Diminuição do hidróxido de cálcio através da substituição parcial do cimento por adições minerais.....	25
3 PROGRAMA EXPERIMENTAL	30
3.1 Materiais Utilizados	30
3.1.1 Cimento	30
3.1.2 Lignosulfonato de sódio.....	31
3.1.2 Agregado miúdo (areia)	31
3.1.3 Agregado graúdo (brita)	32
3.1.4 Cinza de casca de arroz.....	34
3.1.5 Fibra de Sisal	35
3.1.5.1 Ensaio de Tração na fibra.....	36
3.1.5.2 Absorção de água na fibra tratada.....	40
3.2 Especificação do traço	45
3.2.1 Processo de Mistura	46
3.2.3 Procedimento de moldagem e cura.....	47

3.2.4 Ensaio de compressão e tração na flexão.	48
3.2.6 Absorção de água por capilaridade.....	49
4 ANÁLISE DOS RESULTADOS	50
4.2 Absorção de água por capilaridade dos concretos	50
4.2 Resistência à compressão axial	52
4.2 Resistência à tração na flexão	54
5.0 CONCLUSÃO E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	57

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização do tema e justificativa

Diferentes tecnologias e processos para que as propriedades do concreto sejam aprimoradas vem sendo desenvolvidas no mundo. Estudos relacionados aos materiais que o compõem, de modo que aconteça o refinamento das propriedades no estado endurecido e sobre diferentes esforços, e com isso viabilizando ainda mais o seu uso e produção. A procura pela melhora das características se destaca ainda, pela crescente urbanização das cidades e edificações cada vez mais verticais, simultaneamente a isso, elementos estruturais com seções menores e maior capacidade de carga.

Neste contexto, a procura de materiais ou tecnologias que possam aperfeiçoar as características desde material é de fundamental importância. Esse aperfeiçoamento pode vir através da adição de outros materiais como: fibra sintética, fibra orgânica, aditivo químico, adição mineral, entre outros. Alternativas de melhoramento do concreto, devem ainda ser combinadas com uma proposta que diminua os impactos causados pelas indústrias da construção civil, visto que, as atividades ligadas a estes serviços trazem grandes alterações ambientais. Outro problema pode ser relacionado aos elementos laminados de parede fina: caixa d'água, telhas de fibrocimento, os problemas estão relacionados às fibras que o compõem, principalmente nos que utilizam o amianto, podendo provocar doenças respiratórias como câncer pulmonar (TOLENTINO; CAMPOS; OLIVEIRA, 2017; CARDOSO 2017; FIDELIS, 2014).

A incorporação de fibras orgânicas no concreto pode ser justificada, pois este material apresenta comportamento frágil e baixa resistência à tração. Outro problema pode ser relacionado à produção do cimento Portland, onde o alto custo e a grande demanda das matrizes energéticas são fatores que contribuem com a degradação do meio ambiente com grandes quantidades de CO₂ emitidas na queima do clínquer. O uso das fibras orgânicas, como a de curauá, coco, bambu, juta, piaçava, bananeira e sisal, vem sendo uma alternativa sustentável ao substituir as fibras sintéticas (polipropileno, poliestireno, aço, entre outros), evitando assim a retirada de novos recursos do meio ambiente.

O uso da fibra vegetal de sisal vem se potencializado na indústria da construção civil, pois apresentam características propícias para reforçar compósito cimentício. Porém, a vida útil deste tipo de material pode ser reduzida quando submetida a meio alcalino da matriz cimentícia acorrendo a degradação e perda de resistência dos filamentos (FIDELIS, 2014).

Um critério em que requer atenção é a durabilidade da fibra, com alcalinidade excessiva da matriz de cimento Portland ocorre a degradação dos filamentos de fibra orgânica, ocasionado pela hidratação do cimento produzindo hidróxido de cálcio, que migram para as paredes da fibra causando mineralização. Uma alternativa para que este fenômeno seja interrompido, pode ser com o uso de técnicas que possibilitem a impermeabilização da fibra através de um tratamento superficial. Outra alternativa que pode ser tomada é quanto a formação do hidróxido de cálcio, ao inibir a formação através da substituição do cimento por aditivos minerais ou pozolânicos, ou ainda um mecanismo que possa reagir com este elemento quando formado (SILVA, 2009).

Para inibir a degradação da fibra neste trabalho, será adotado um tratamento superficial na fibra com uma solução aquosa de lignosulfonato de sódio e cinza da casca de arroz, para que ocorra a redução da higroscopia da fibra evitando que a água da matriz seja absorvida. A adição da cinza como tratamento superficial tem como objetivo diminuir o hidróxido de cálcio da matriz em contato com a superfície da fibra. Outro tratamento será realizado na matriz cimentícia, com a substituição parcial do cimento Portland por cinza de casca de arroz, para que seja reduzida a alcalinidade da matriz, através da reação do hidróxido de cálcio com a cinza, formando silicato de cálcio hidratado.

O presente trabalho busca trazer alternativas de sustentabilidade as Matrizes de cimento Portland (principal produto utilizado na construção civil, onde existe uma grande carência em relação a alternativas sustentáveis), com adição da bucha de sisal (subproduto do beneficiamento das fibras longa de sisal no semiárido baiano) e cinza de casca de arroz (produto gerado pela queima da biomassa de casca do arroz para a geração de energia elétrica). Deste modo este trabalho tem como principal intuito gerar elementos mais sustentáveis e com propriedades melhores, com os resíduos de baixo custo advindo do processamento da agricultura.

O principal objetivo da implantação da UNIPAMPA- Universidade Federal do Pampa, é desenvolver materiais que possibilitem a economia de bens e serviços através de pesquisa nas diversas áreas do conhecimento promovendo extensão

universitária justificando assim esse trabalho, onde será feito adições de fibra de sisal e cinza de casca de arroz ao concreto buscando aprimorar as suas propriedades e desenvolver a sustentabilidade.

Outra justificativa considerável seria a grande necessidade de atribuir métodos e materiais que possam não somente melhorar as propriedades dos concretos, mas introduzir o conceito de materiais biodegradáveis e sustentáveis na construção civil. Deste modo com a utilização da cinza de casca de arroz, quantidades menores desse produto serão descartadas inapropriadamente no meio ambiente sendo possível sua reutilização como aditivo mineral ao concreto.

1.2 Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho consiste em avaliar a eficácia do tratamento de fibras de sisal com lignosulfonato em matrizes de concreto, comparadas ao uso de cinza de casca de arroz na solução de tratamento e também como substituição parcial do cimento na matriz, visando diminuir o meio alcalino.

1.3 Objetivo Específico

Este trabalho divide-se nos seguintes objetivos específicos:

- a) Analisar a capacidade de tração da fibra com e sem tratamento;
- b) Avaliar o tratamento superficial da fibra, quanto a absorção de água;
- c) Avaliar a capacidade de absorção de água por capilaridade de compósitos cimentícios reforçados com fibra de sisal para os diferentes tratamentos;
- d) Avaliar a resistência mecânica (compressão e tração na flexão) de compósitos cimentícios reforçados com fibra de sisal para os diferentes tratamentos em diferentes idades.

2 CONCEITOS GERAIS E REVISÃO DE LITERATURA

Neste capítulo será abordada toda a fundamentação teórica utilizada para compor o trabalho em desenvolvimento. Uma visão técnica das pesquisas, bem como, análise dos resultados alcançados por diferentes pesquisadores.

A ênfase desta revisão será na fibra natural de sisal, bem como estratégias adotadas para que a fibra possa ser utilizada como reforço em matriz cimentícia, comprimento de embebimento na matriz, comportamento sobre carregamentos e esforços, análise do tratamento superficial da fibra para um melhor desempenho da sua higroscopia. Além disso, serão abordados alguns mecanismos adotados para a preservação e durabilidade da mesma em meio alcalino.

2.1 Compósitos

As fases constituintes do compósito devem ser quimicamente diferentes e separadas por uma interface distinta. No projeto de materiais compósitos busca-se por combinar materiais com propriedades individuais para se obter um único material com características mecânicas melhores, como por exemplo, rigidez, tenacidade e resistência. Os compósitos ainda são formados por duas fases, uma contínua chamada de matriz, e a outra que pode ser envolvida conhecida como fase dispersa (CALLISTER JR, 2003).

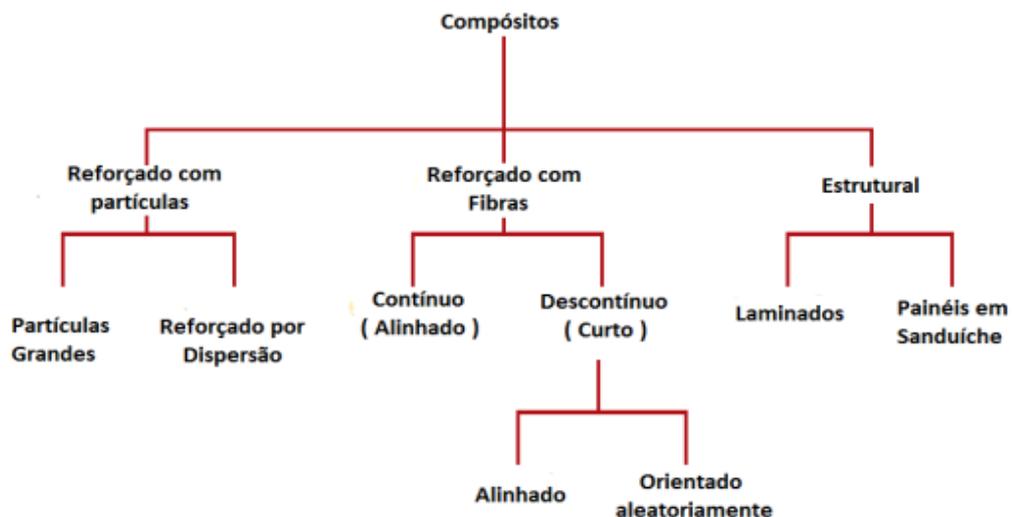
A fase matriz pode ser de metal, polímero ou cerâmico que confere a estrutura ao material, preenchendo os espaços vazios que ficam no reforço e o mantém na posição. Já a fase dispersa ou reforço existe em diversas formas, sendo a mais geral em três categorias: compósitos particulados, compósitos de fibras descontínuas, e compósitos de fibras contínuas. A principal função do reforço no compósito é proporcionar força, rigidez, aumentar a resistência ao calor, corrosão e condutividade. O reforço pode ser adicionado para sanar todas ou apenas uma dessas características, dependendo do tipo ou requisito do novo material (VENTURA, 2009).

Os compósitos reforçados com fibras, tem características mecânicas que não dependem somente da propriedade da fibra, mas também de como o carregamento é aplicado e transmitido a fibra pela face da matriz. A magnitude da ligação entre fibra-matriz é importante para a transição da carga. Um comprimento de fibra é necessário para que ocorra um aumento efetivo da resistência do compósito. Este comprimento

depende do diâmetro da fibra que irá reforçar, e do comprimento final da fibra dentro da matriz, bem como a força de ligação entre fibra e a matriz (CALLISTER JR, 2003).

A classificação dos compósitos pode se dar por três diferentes divisões principais, que são: os compostos reforçados com partículas, compósitos reforçados com fibras, e os compósitos estruturais. Para um compósito ser classificado com particulado, as dimensões das partículas são aproximadamente as mesmas em todas as direções, e iguais em todos os eixos. Já para ser considerado um compósito reforçado com fibra, uma grande razão entre comprimento e diâmetro deve-se existir. Já os compósitos estruturais são combinações de compósitos e materiais homogêneos (CALLISTER JR, 2003). A Figura 1, apresenta os grupos e subgrupos dos compósitos.

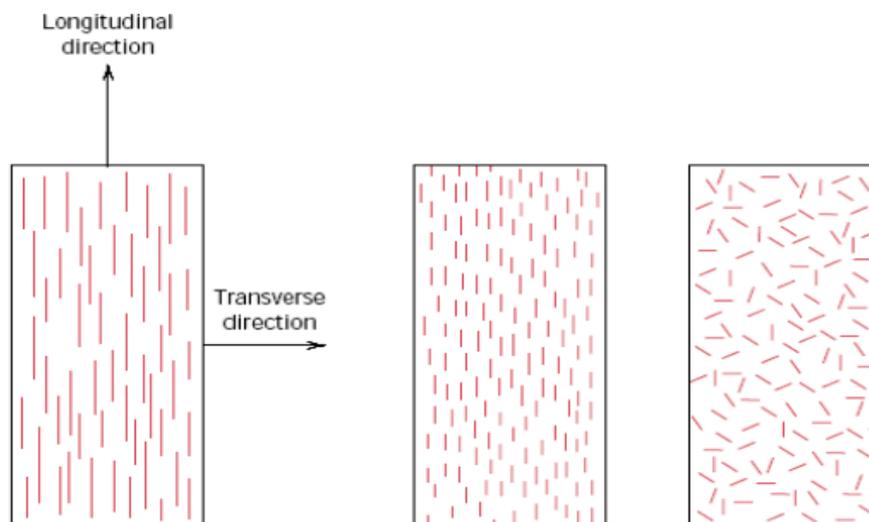
Figura 1 – Classificação dos compósitos segundo os grupos e subgrupos.



Fonte: Callister JR (2003), adaptado

A orientação das fibras tem uma influência sobre a resistência e as propriedades dos compósitos que as utilizam como reforço. A orientação é possível em duas formas, isto é, uma alinhada paralela ao eixo longitudinal das fibras e em um único sentido, onde esta orientação geralmente se utiliza fibras contínuas, já para o alinhamento totalmente aleatório, geralmente usa-se fibras descontínuas e curtas (CALLISTER JR, 2003). A Figura 2, representa a orientação da fibra em uma matriz reforçada com fibra contínuas e alinhadas, descontínuas e alinhadas, descontínuas e aleatoriamente desalinhadas.

Figura 2 – Representação esquemática, orientação e distribuição da fibra



Fonte: Callister JR (2003), adaptado

O concreto é um dos materiais compósitos mais utilizados, sendo compostos por minerais encontrados em larga escala na natureza. É formado por partículas ligadas umas às outras através do ligante (cimento) formando um corpo sólido (CALLISTER JR, 2003). O concreto é o material estrutural mais consumido no mundo, porém, este material apresenta limitações quando solicitado à tração exibindo um comportamento frágil, com baixa capacidade de deformação e suscetível propagação de fissuras. Entretanto, as propriedades no estado endurecido e sob compressão são características que possibilitam ao concreto ser considerado um material estrutural. Como o uso é crescente no mundo, há uma necessidade em estudar formas de aprimorar suas propriedades em diferentes solicitações. O uso de fibra tem como finalidade sanar a deficiência do concreto sob esforço de tração, atribuindo as características da fibra ao concreto (FIGUEIREDO, 2005).

Alternativas para minimizar as limitações no concreto quando submetidos a esforços de tração são estudados em diferentes pontos, além das armaduras convencionais que vão posicionadas em lugares estratégicos de modo que os esforços de tração sejam absorvidos pelo aço, outras alternativas devem ser adotadas para que limite a propagação de microfissuras no concreto. Quando se refere à matriz cimentícia, a formação de fissuras ocorre quando for submetida a esforços de tração. Uma possibilidade para diminuir a propagação destas fissuras na matriz é a adição de fibras dispersas diretamente na mistura no processo de fabricação do concreto, de modo a reduzir o consumo de aço, mão de obra e custo. Fibras como a de aço e

polipropileno são as mais utilizadas como reforço, principalmente por questões econômicas (CASTOLDI, 2018).

A utilização das fibras como reforço em concretos tem sido discutida em diferentes pesquisas. O conceito de sustentabilidade pode ser vinculado à construção civil por meio das fibras naturais orgânicas, pois são provenientes de fontes renováveis apresentando baixo custo de extração e produção (FIDELIS, 2014).

São inúmeras as vantagens que se pode obter com o uso de fibras naturais celulósicas, dentre essas vantagens vale destacar o baixo custo na produção, baixa densidade, resistência específica e módulo elevados, além de ser facilmente modificado por agentes químicos, são altamente sustentáveis. Suas propriedades mecânicas podem ser comparadas a reforços sintéticos empregados na indústria polimérica. Dentre as fibras naturais, uma que se pode destacar por sua elevada resistência contra impactos, moderada resistência à tração e em flexão, o sisal apresenta grande relevância (JOSEPH, MEDEIROS, CARVALHO, 1999).

A incorporação de tecnologias que propõe a adição de fibras naturais em matriz cimentícia, busca aprimorar as características do concreto, melhorando o desempenho quanto à resistência mecânica, deformação, custo benefício e sustentabilidade na indústria dos concretos, além de promover concretos com maior capacidade de carga (VARGA, 2017).

A busca de sustentabilidade na construção civil vem sendo muito discutida nos últimos anos, além da necessidade por elementos concretos mais resistentes e sustentáveis. A adição de fibras naturais de sisal vem sendo um caminho cada vez mais adotado. O Brasil por ser o maior produtor deste tipo de material fibroso, e de baixo custo na produção, isento de uma grande industrialização, torna-se uma alternativa cada vez mais viável, além de uma prática muito aceitável, de modo, que a demanda nas matrizes energéticas do agronegócio seja reduzida drasticamente com o uso deste material fibroso (SILVA, 2009).

A produção de componentes laminados de seção fina, se deu por meio de cimento e asbesto. Este compósito foi o principal produto utilizado na produção de telhas, caixas d'água e painéis. Porém, fibras de asbesto foram proibidas, por provocarem doenças respiratórias, como por exemplo câncer pulmonar. A dificuldade está relacionada a encontrar uma fibra capaz de ter as mesmas propriedades que o asbesto, e com baixo toxicidade aos seres vivos (TOLENTINO; CAMPOS; OLIVEIRA, 2017)

Há uma diversidade na aplicação de fibras naturais, tal como, na produção de têxteis e artesanatos, ou até mesmo em compósitos de alta resistência, como na indústria automotiva. Fibras naturais apresentam algumas desvantagens, quando utilizado como reforço em compósitos cimentícios, como por exemplo: a qualidade e eficiência do produto, que depende das condições naturais, a heterogeneidade de suas propriedades associada a produção e extração, condição de processamento das fibras e seu comportamento hidrofílico que leva absorção de água nos compósitos (PEREIRA *et al.* 2012).

2.2 Interação Fibra-matriz

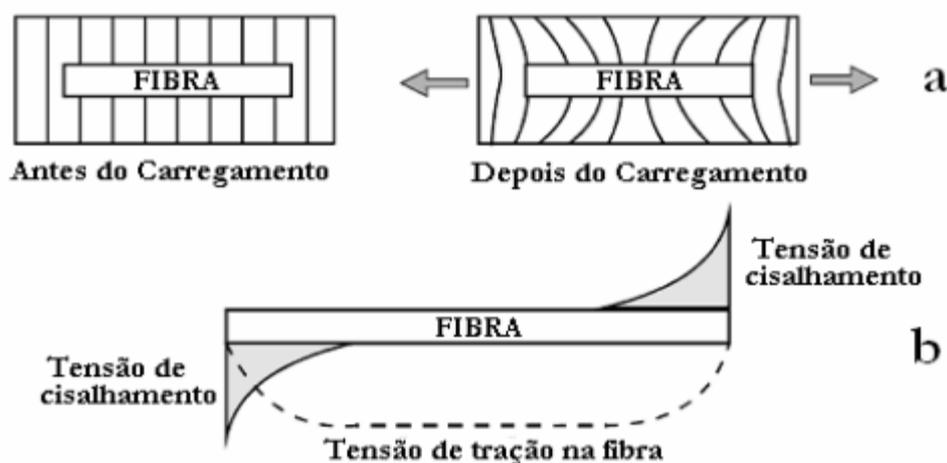
Os concretos convencionais utilizados nos dias atuais apresentam limitações quando submetido a tração, estudos que viabilizam este material sobre esse tipo de solicitação são desenvolvidos constantemente. O comportamento com concreto convencional fica comprometido já que essa matéria possui microfissuras na zona de transição (agregado graúdo), logo é necessária pouca energia para que possa ocorrer a falha no material. Quando esforços de tração direta ou tração na flexão são aplicadas ao concreto, as tensões tendem a propagar a microfissura ocasionado o aumento, assim a falha do material se apresenta de forma frágil.

O uso do concreto com fibra é amplamente utilizado com o objetivo de minimizar a deficiência deste material. Os compósitos formados por fibras dependentes da sua capacidade para ligar as fissuras. Esta capacidade está relacionada com o teor de fibras dispersas na mistura e a eficiência da interação fibra-matriz, que por sua vez, é influenciada pelo diâmetro e comprimento em que a fibra é embebida no compósito, e pela ancoragem da fibra da matriz. As fibras adicionadas com teor e quantidade correta no compósito cimentício de cimento Portland deixam de ter um comportamento frágil e se torna um material pseudo-dúctil, onde a uma maior absorção de energia influenciada pelas fibras que limitam a propagação de fissura. Com isso possibilita o compósito cimentício uma maior capacidade de fissuração (FIGUEREDO 2011).

O comportamento da compósito cimentícia é controlado pelos processos de transferência de tensão da matriz para as fibras. Em matrizes frágeis, como as de cimento Portland, a transferência de tensão é influenciado por fatores, como: o comprimento de embebedimento da fibra, capacidade de ancoragem da fibra pela matriz,

condição da matriz (engrenamento das partículas que a compõe), ou ainda, condições geométricas do material fibroso parâmetros como: diâmetro, forma e o teor de fibra podem influenciar diretamente na transferência das tensões do compósito (PASA 2007). Segundo Bentur e Mindess (2006), a transferência de tensão antes da fissuração pode se caracterizar em regime elástico, onde a compatibilidade entre os deslocamentos longitudinais na ligação da fibra com matriz, sendo geometricamente compatíveis Figura 3 a. Os autores afirmam ainda, que as tensões tangenciais desenvolvidas na interface da fibra não são uniforme, conforme ilustrado na Figura 3 b.

Figura 3 – Linhas de tensões no compósito (a); e distribuição das tensões de cisalhamento na interface fibra-matriz (b)



Fonte: (Bentur e Mindess 1990, *apud* PASA, 2007)

Após o surgimento da primeira fissura no material a tensão de atrito é desenvolvida na interface da fibra, sendo uniformemente distribuída. Esse processo promove ao compósito uma capacidade de carga após a falha da matriz, ou seja, as fibras ainda rebem carregamento e as transmitem para a matriz através da ligação do seu comprimento de fibra envolvido pela matriz. O mecanismo de transição da tensão elástico para transferência de tensão por atrito ocorre quando a resistência última de aderência entre fibra e matriz ultrapassada (T_{au}) Figura 4, zona não fissura e o regime linear elástico do material. Logo após essa transição a tensão que prevalece é a tensão tangencial de atrito, onde a máxima tensão de atrito que pode ser aplicada ao material é denominada (T_{fu}). A Figura 4 apresenta as tensões tangenciais de

cisalhamento na interface fibra-matriz, e as tensões de atrito geradas após a fissuração do material.

Figura 4 – Representação das tensões tangenciais de cisalhamento na interface da fibra-matriz



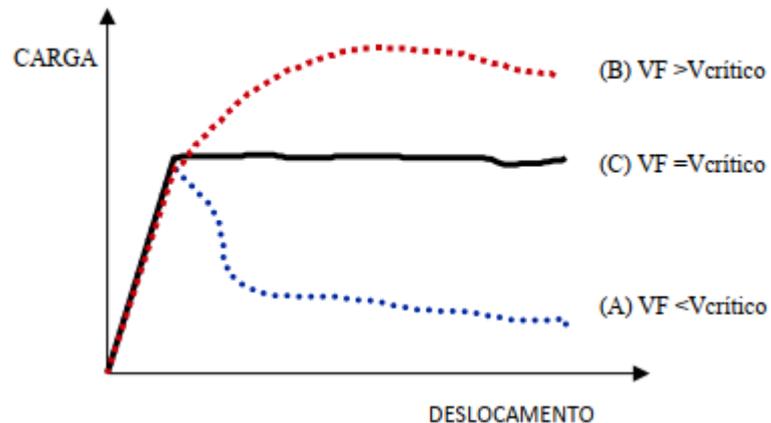
Fonte: Fonte: Bentur e Mindess (2006), adaptado

Outro fator relevante para se considerar em compósito cimentício é o volume de fibra que será utilizado, esse parâmetro define o comportamento do compósitos. Com isso Figueredo (2011) demonstra que quanto maior o volume de fibra que for adicionadas a um compósito, maior será o número de fibras que atuam como ponte de transferência de tensões ao logo da fissura, de modo que seja maior o refoço após a fissuração. Por outro lado, quanto maior o volume de fibra adicionada ao compósito a uma dificuldade a obtenção de uma matriz homogênea, podendo haver pontos de aglutinação de fibra afetando na trabalhabilidade e no desempenho do compósito.

O volume crítico é definido como o teor de fibra que mantém a mesma capacidade de suporte para o compósito após a ruptura da matriz. Assim o compósitos de cimento Portland podem ser divididos em duas classes. Na primeira, o material tem comportamento *strain-softening*, ocorre a perda da capacidade resistente após a formação da primeira fissura. Já na segunda classe, o compósito é denominado *strain-hardening*, onde a um ganho na capacidade resistente após a formação da primeira fissura da matriz FIGUEREDO (2011). Esse conceito está ilustrado na Figura 5, onde é apresentado as curvas de cargas por deslocamento. As curvas apresentam estagio inicial iguais, com um regime linear elástico, que corresponde ao regime linear elástico do compósito, após isso as curvas apresentam comportamento diferente,

onde a curva A é um composto reforçado com um volume de fibra abaixo do volume crítico com comportamento *strain-softening*, já na curva B, é representado um composto com um volume maior que o volume crítico e comportamento *strain-hardening*, a curva C é apresentada o volume crítico do composto PASA (2007).

Figura 5 – Compósito reforçado com fibra (VF); curva (A) abaixo do volume crítico; curva (B) acima do volume crítico; (C) volume crítico do material.



Fonte: Fonte: Figueredo (2011)

2.2.1 Fibra de Sisal

A agave Sisalana Perrine, conhecida comumente como sisal, é uma planta oriunda do México apresentando uma gama enorme na utilização de suas fibras, que são extraídas das folhas. Atualmente os maiores produtores de sisal são o Brasil, Tanzânia, Quênia, Uganda, Moçambique, Angola e México. A produção brasileira de sisal pode ser estimada em 61% da produção mundial, com cerca de 314,7 mil toneladas. Concentrando a maior parte da produção no estado da Bahia, cerca de 95% da produção brasileira, com uma produtividade em 2005 de 214,4 mil toneladas QUEIROGA *et al.* (2021). A Figura 3 ilustra (a) planta do sisal, (b) planta do sisal após a colheita (c) secagem das fibras após a despolpa.

Figura 6 – Detalhe: (a) planta do sisal, (b) após a colheita, (c) secagem das fibras.



(a)



(b)



(c)

Fonte: (Elaboração própria)

O ciclo de colheita da planta agave sisalana se inicia aos 3 anos de idade ou quando suas folhas apresentam um comprimento de 140 cm, o que pode resultar em fibras com até 120 cm. As folhas são colhidas a cada seis meses, podendo ser cultivadas até aos 7 anos após a primeira colheita. As fibras representam de 4 a 5% da massa bruta da folha. O primeiro beneficiamento da fibra é efetuado após o corte, de modo que as folhas não desidratam assim garantindo que toda a polpa seja removida, e somente as fibras sejam extraídas. Após a colheita a folha é introduzida em uma máquina parnaibana onde ocorre a despolpa ou desfibramento, a Figura 4 ilustra uma folha de sisal após a primeira etapa de despolpa (QUEIROGA *et al.* 2021).

Figura 7 – O primeiro passo do desfibramento na folha do sisal

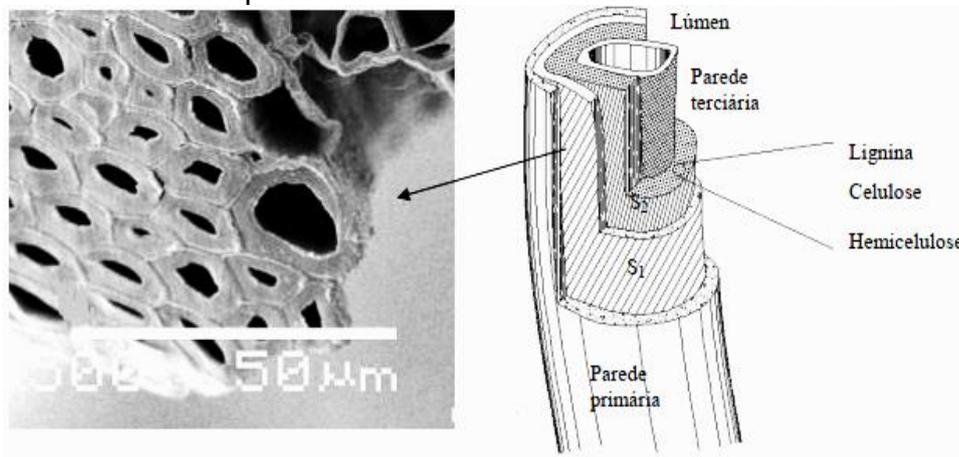


Fonte: QUEIROGA *et al.* (2021)

Segundo Ansell, Mwaikambo, Li (2009), a fibra de sisal é constituída por 73% de celulose, 13% de hemicelulose, 11% de lignina e 2% de pectina. A composição química de fibras lignocelulósicas tem influência nas suas propriedades mecânicas e estrutura física, sendo que o conteúdo de lignina e hemicelulose presente em fibras como a de sisal, tem efeito sobre a resistência à tração destas fibras.

Toledo Filho *et al.* (2009) explica a microestrutura da fibra de sisal, sendo que a fibra é composta por numerosas fibras individuais (células da fibra), que tem um diâmetro variando entre 6 e 30 μm . Cada célula da fibra individual, é composta de quatro partes principais: parede primária, parede secundária e parede terciária. Essas camadas são dispostas a envolver o lúmen. Na Figura 5 a representação esquemática mostrando as diferentes camadas de uma célula individual.

Figura 8 – Desenho esquemático da célula individual de fibra de sisal



Fonte: Toledo Filho *et al.* (2009) adaptado

Fidelis (2014), fez o comparativo quanto a morfologia das fibras naturais usadas como reforços em matriz cimentícia. Concluiu-se que, apesar de apresentar a morfologia padrão, as fibras apresentam aspectos diferentes quanto à área de seção transversal. Comparativamente às fibras de Caruaru e Juta, a fibra de sisal teve maior área com menor número de lumens. Na tabela 1 observa-se as diferentes características das fibras em relação ao comportamento mecânico, morfologia e composição química das diferentes fibras.

Tabela 1 – Resultados de comportamento mecânico, morfologia e composição química das fibras de juta, sisal e curauá

		Juta	Sisal	Curauá
Comportamento Mecânico	Modulo de Elasticidade (GPa)	43,9 (12,3)	19,5 (4,5)	63,7 (32,5)
	Resistência (MPa)	249 (89)	484 (135)	543 (260)
	Capacidade de deformação (%)	0,6 (0,2)	3,3 (1,6)	1,0 (0,2)
Morfologia	Área total (mm ²)	0,004	0,023	0,004
	Área lumens (µm ²)	1014,1	5796,9	162,2
	Área real (mm ²)	0,003	0,0172	0,0038
	índice de cristalinidade (%)	75,2	76,3	80,1
Composição química	Teor de Celulose (%)	72,0	59,5	59,4

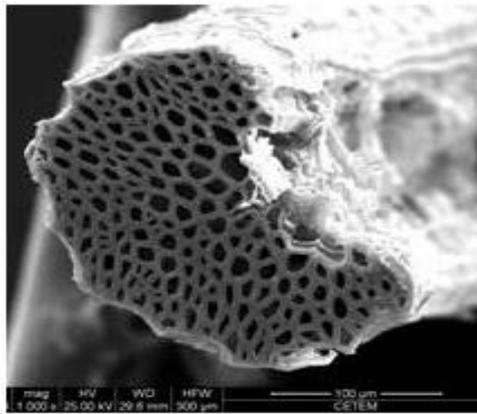
Fontes: Fidelis (2014), Adaptado.

As propriedades mecânicas das fibras naturais são determinadas pelo componente celulose que compõe a fibra. Este polissacarídeo é composto de carbono, oxigênio e hidrogênio e sua formação química é (C₆H₁₀O₅). Durante a síntese da celulose as ligações poliméricas formam longas cadeias fazendo com que, as moléculas se aproximem formando o segmento, que dão origem às fortes ligações químicas intermoleculares, responsáveis pela elevada resistência dos materiais celulósicos (TOMCZAK, 2010).

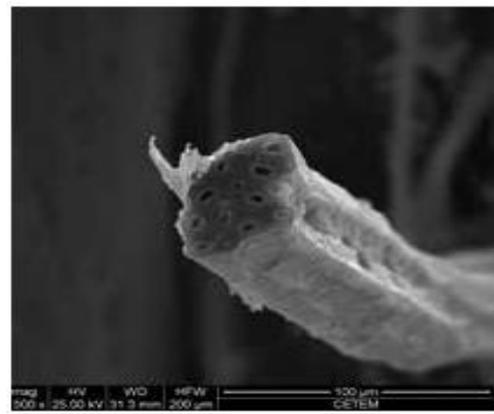
A fibra que confere resistência às folhas, são chamadas de fibras estruturais e de grande interesse econômico, pois quase nunca se rompem no processo de desfibramento. A seção transversal da fibra de sisal tem um formato de ferradura composta por células de paredes finas (SILVA, MOBASHER, TOLEDO FILHO, 2009).

Através da Figura 6, observam-se as diferentes seções transversais das fibras naturais, além de ser possível analisar as diferentes geometrias, dentre elas, as características de cada fibra em particular. Há uma variação enorme quanto às propriedades mecânicas das fibras naturais usadas como reforço, fatores como: diâmetro, estrutura da fibra, origem da fibra (folha, fruto, semente, caule) e as condições de cultivo da planta. Outro fator que tem influência nestes parâmetros é a calibração dos instrumentos que irá promover o ensaio Ansell, Mwaikambo, L.y, (2009). A Figura 6 pode ser visualizada na micrografia da seção transversal das fibras de sisal, caraúá, juta, piaçava e coco.

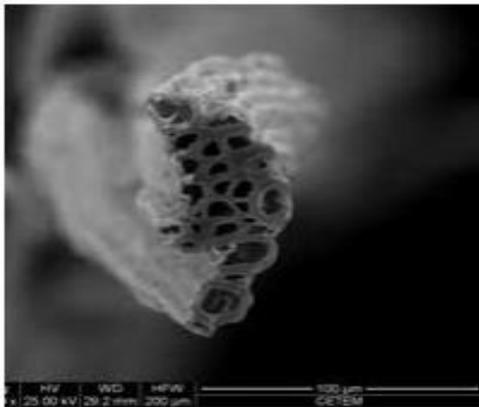
Figura 9 – Micrografias das fibras de (a) sisal; (b) caraúá; (c) juta; (d) piaçava;(e) coco



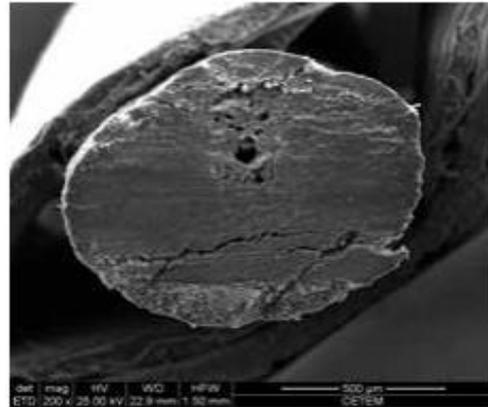
(a)



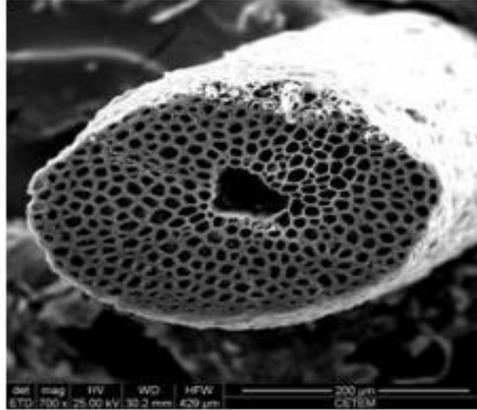
(b)



(c)



(d)



(e)

Fonte: Fidelis (2014)

2.3 Proteção da fibra em meio alcalino

Nos itens a seguir são discutidos os tratamentos mais comumente estudados para tratar a fibra e amenizar ou diminuir o dano gerado pela formação do hidróxido de cálcio na matriz cimentícia. Os tratamentos podem ser por imersão em uma solução, ou através de um processo, que podem melhorar as propriedades e características da fibra.

2.3.1 Tratamento superficial da fibra

Fibras naturais quando expostas a ambientes alcalinos podem sofrer ataques e se degradam. A extensão do ataque é determinada pela perda de resistência da fibra, e o quanto de alcalinidade que foi exposta. Segundo Toledo filho *et al.* (2009), a degradação das fibras orgânicas em meio alcalino pode ser de dois modos: (i) pela decomposição química da lignina e da hemicelulose na lamela média, o que ocasiona a quebra da ligação entre as fibras individuais, inibindo que a fibra possa reforçar a matriz; (ii) pela cristalização da cal no lúmen nas paredes das fibras individuais e na lamela média, causando uma diminuição na flexibilidade na capacidade de carga da fibra. Como possíveis soluções para mitigar este fenômeno, pesquisadores propõem diferentes tratamentos para inibir a formação do hidróxido de cálcio na matriz, ou como por exemplo um tratamento superficial visando mudar as características da superfície da fibra, de modo a inibir a higroscopia da fibra.

Cardoso (2017), propôs um tratamento na fibra com impregnação de uma substância com polímero termoplástico EPS dissolvido em solvente (Toluol P.A.) com adição de SCA (sílica de casca de arroz). De modo que não ocorra a degradação da mesma pelos álcalis da matriz cimentícia, a sílica da casca do arroz que acrescida na mistura irá reagir com o hidróxido de cálcio, formando outra substância, o silicato de cálcio hidratado. Isso ocasiona uma superfície de interação fibra-matriz inerte mantendo a fibra preservada. Com relação a absorção de água, o tratamento foi satisfatório, pois as fibras impregnadas não apresentaram perda de resistência à tração, com o tratamento superficial. Os resultados do ensaio à tração, permaneceram dentro do padrão da fibra sem tratamento algum. Porém, por se tratar de uma solução muito densa, as fibras impregnadas apresentaram pontos de aglutinação o que interferiu na análise da interação da fibra com a matriz. Ainda relacionando tratamento superficial da fibra com a matriz, a interação fibra-matriz não alcançou os resultados desejados.

Noronha et. al. (2020), com intuito de promover matrizes cimentícias mais sustentáveis, capazes de diminuir os riscos à saúde, e de isentar o uso do amianto tipo crisotila, produziu uma matriz com fibra de sisal tratada. O tratamento da fibra se deu por uma solução com 5% de hidróxido de sódio. As fibras foram submetidas à imersão em solução por uma hora, de modo que se obtivessem as propriedades adequadas no tratamento. Com o intuito de avaliar o tratamento e a resistência do composto, ensaios de flexão nas idades de 7 a 14 dias foram efetuados. Os resultados mostraram eficácia quanto ao tratamento, pois as fibras apresentaram aspectos esbranquiçados e baixa absorção. Analisando a matriz na flexão, o tratamento de hidróxido de sódio uma resistência à flexão de 5,80% foi apresentada, em comparação com argamassa com fibra sem tratamento.

Ferreira *et.al* (2012) promoveu uma pesquisa, cujo procedimento constituiu-se na imersão das fibras por 3 horas em água para a saturação total, e sua retirada para secagem em estufa, repetindo o procedimento em 10 ciclos de molhagem e secagem. Como resultado, percebeu-se que ocorre uma variação dimensional da seção transversal da fibra no estado seco para o estado saturado. Verifica-se ainda que a hornificação (fenômeno causado pelos ciclos molhagem e secagem, onde a fibra perde flexibilidade e ocorre a mudança de algumas características como: higroscopia, resistência), causada pelos ciclos de molhagem e secagem, o que modificou o comportamento tensão-deformação das fibras sob tração direta. Em relação a

aderência fibra na matriz houve um aumento expressivo na ancoragem da fibra, com zonas de aderência perfeita em determinados intervalos de carga.

Gualberto (2020) estudou o comportamento do fibrocimento reforçado com fibra de sisal pura e com impregnação por uma solução aquosa de lignosulfonato, com valores que variaram em 1%, 2% e 4% de lignosulfonato em função da massa das fibras. Foram comparadas as propriedades morfológicas e mecânicas das fibras tratadas e sem tratamento. As análises do tratamento superficial se mostraram eficazes, onde as imagens obtidas pelo MEV ilustraram a impregnação do lignosulfonato nas camadas externas das fibras. Os resultados mecânicos apontam que os compósitos com fibras impregnadas com porcentagem de 1% dessa solução têm maior resistência à flexão, e uma menor absorção nas primeiras idades. Uma queda na resistência em todas as porcentagens de impregnação para as idades de 90 e 180 dias também foram observadas. Apenas os compósitos impregnados com 4% de lignosulfonato passam a ter a maior resistência à flexão em comparação aos demais compósitos e uma absorção maior, mostrando que os efeitos do lignosulfonato melhoram com o tempo. O tratamento se mostrou eficiente quanto a preservação da fibra em meio alcalino, um ganho na tenacidade dos compósitos pode ser observado nas quantidades de 1 e 4% em comparação aos compósitos com fibra sem tratamento.

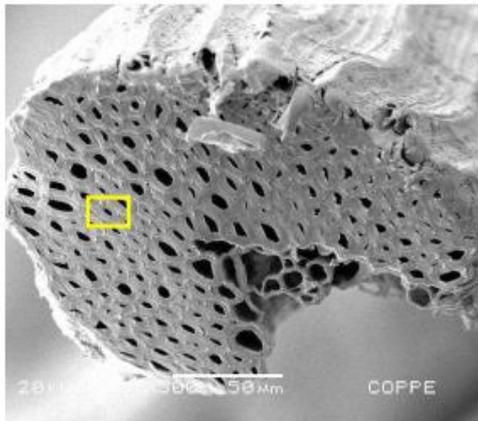
Oliveira (2010) procurou alternativas sustentáveis como forma de produzir um compósito polimérico termorrígido reforçado com fibra de sisal. O objetivo do estudo além de propagar a ideia com alternativas mais ecológicas, buscou o melhoramento da molhabilidade das fibras, e melhor interação na interface fibra matriz. As fibras tiveram um comprimento fixado em 30 mm, e submetidas a quatro diferentes tipos de tratamento, todos com 5% de lignosulfonato de sódio em massa. Os tratamentos para as fibras se deram pela imersão da fibra na solução aquosa de 12,5g de lignosulfonato de sódio em 1000 ml de água, a amostra M1 foi submetida a uma agitação mecânica com uma temperatura de 70°C, já na modificação M2 a amostra foi exposta à irradiação de ultrassom por 1 hora, o mesmo processo se repetiu com a modificação M3, porém o tempo de exposição a irradiação foi de 2 horas, a modificação M4 as fibras foram submetidas a imersão de 14 horas, com 1 hora de irradiação de ultrassom. Os resultados obtidos mostraram que o tratamento na matriz polimérica foi uma escolha acertada, de modo que ocorreu uma compatibilização entre o reforço e a matriz. Ocorreu também uma melhora do termorrígido ao impacto, e na interação fibra-matriz com uma boa adesão.

2.3.2 Diminuição do hidróxido de cálcio através da substituição parcial do cimento por adições minerais

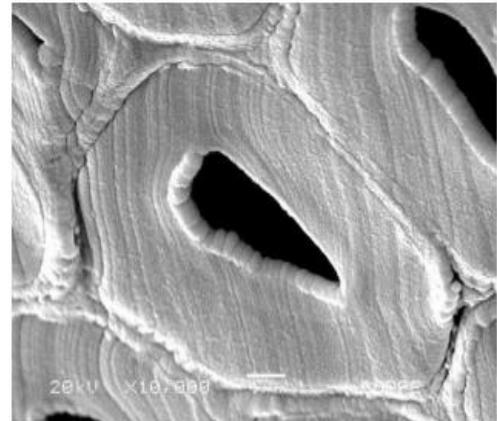
A produção de materiais cimentícios reforçados com fibras naturais vem se tornando uma alternativa cada vez mais viável, essa proposta de reforço com adição destas fibras é uma prática que promove estudo em uma diversidade de critérios. Um critério em que a atenção é redobrada é quando a durabilidade da fibra, pois o meio alcalino da matriz é prejudicial às fibras, a hidratação do cimento em especial produzirá hidróxido de cálcio, que migram para as paredes da fibra causando mineralização da mesma (SILVA *et al.*, 2009, TOLEDO FILHO *et al.*, 2009, MELO FILHO 2012)

Algumas soluções para minimizar ou sanar de vez o problema da degradação da fibra, é o tratamento superficial, de modo que o hidróxido de cálcio não permaneça em contato direto, ocasionando a diminuição da vida útil da fibra, ou ainda adições minerais que reagiriam com o hidróxido de cálcio, produzindo uma solução inerte na matriz. Melo Filho (2012) quando produziu um compósito cimentício à base de cimento Portland, fez a substituição parcial de 50% em massa de cimento por metacaolinita e pozolana de alta reatividade. A matriz com essa configuração proposta, inibiu a formação do hidróxido de cálcio, mantendo a fibra preservada nas idades de 180 dias e 5 anos. Nas imagens a seguir é possível analisar a microestrutura da fibra em natura (a) com ampliação de 500 vezes e (b) 10000. E as figuras (c) com resolução de 500, (d) com resolução de 10000, fibra retirada de uma amostra com idade de 5 anos com cura em laboratório.

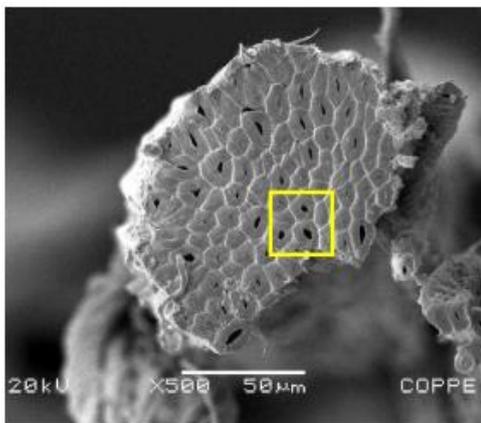
Figura 10 – Microestrutura da fibra em natura (a), (b); fibra retirada de uma amostra com idade de 5 anos (c), (d).



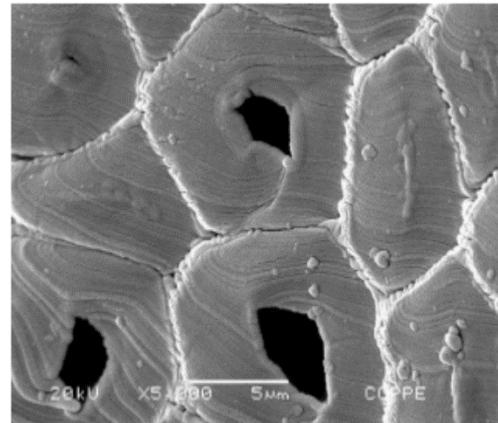
(a)



(b)



(c)



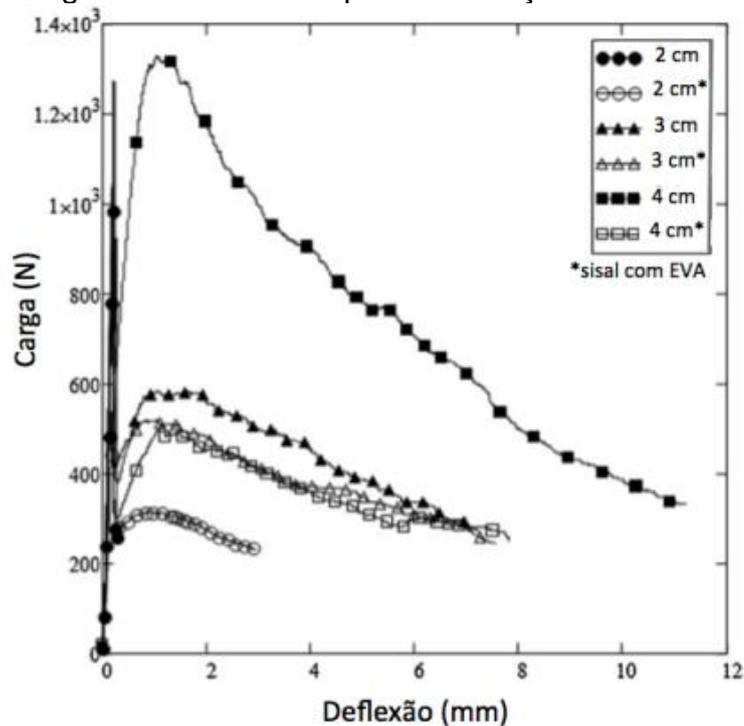
(d)

Fonte: Melo Filho (2012)

Pesquisas com os objetivos de desenvolver e caracterizar mecanicamente um compósito cimentício reforçado por fibra de sisal de elevada durabilidade e desempenho mecânico compatível ao seu uso como elemento estrutural, foi estudado por (SILVA, 2009). Os compósitos foram produzidos com substituição parcial do cimento por 50% de argila calcinada e não apresentaram sinal de degradação após ciclos de molhagem e secagem quando ensaiados por flexão. Ciclos de molhagem e secagem e imersão em água quente foram realizados para acelerar o envelhecimento dos compósitos. A matriz foi caracterizada a partir de análises térmicas sendo que, aos 28 dias de idade, não foi observada a presença hidróxido de cálcio, apresentado resultados indicativos que a matriz desenvolvida evita a mineralização das fibras mantendo a tenacidade dos compósitos.

Santos *et al.* (2016) produziu uma matriz cimentícia onde resíduo de EVA (etileno vinil acetato) foi adicionado à matriz cimentícia, o conceito foi produzir uma matriz leve e que possa minimizar os efeitos da tração no concreto, com a sustentabilidade na construção civil. Como o EVA não tem grande capacidade de resistência sobre esforços de tração, os autores optaram pela introdução de fibras de sisal e piaçava com diferentes porcentagens de fibra, com e sem o agregado de EVA. O objetivo da pesquisa foi produzir um compósito cimentícios com agregado industrial, e a uma análise comparativa entre os compósitos cimentícios produzidos separadamente com cada fibra. Diferentes comprimentos de fibras de sisal foram utilizados como reforço na matriz cimentícia com dosagem de 2% e 6%, a partir de ensaios de flexão em três pontos a fibra com comprimento de 4 cm apresentaram melhores resultados Figura 8, a integridade da fibra foi mantida com a substituição por parte do cimento por metacaulim e cinza volante.

Figura 11 – Curvas carga-deflexão de compósitos reforçados com sisal.

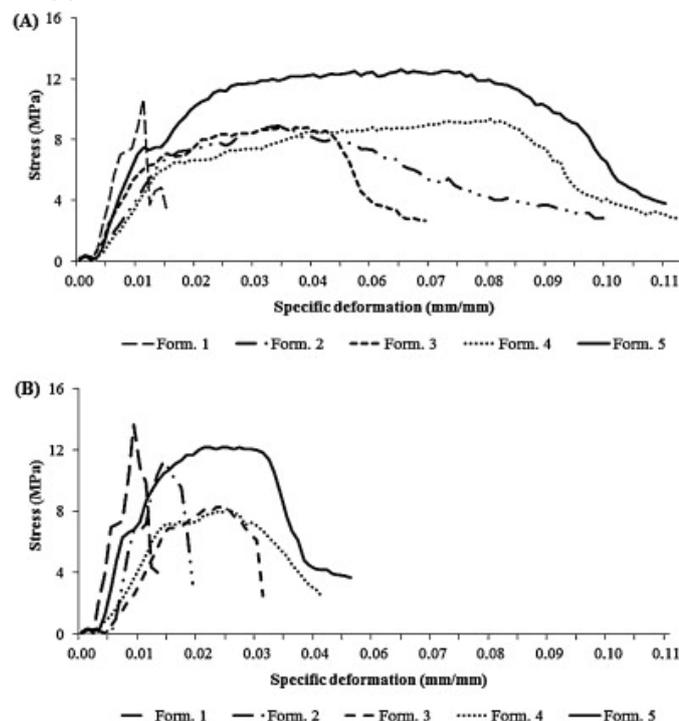


(Santos *et al.* 2016, adaptado)

A cinza de casca de arroz vem se tornando uma prática muito comum para a produção de concretos, onde a adição deste mineral com alto teor de sílica permite sua aplicação ao concreto como aditivo pozolânico, em que se obtém melhores características e propriedades no que refere a porosidade e ganho de resistência em idades avançadas. Pereira *et al.* (2013) analisou o comportamento da matriz

cimentícia com polpa celulósica gerada a partir de saco de cimento Kraft e fibra natural de coco verde com substituição de 50% do cimento por cinza de casca de arroz. A utilização da fibra de coco foi para proporcionar melhor desempenho mecânico da matriz frágil. No que se refere a preservação da fibra, as reações pozolânica entre sílica de casca de arroz e a portlandita promoveu estabilidade química, com a redução da alcalinidade da matriz. Relacionando a substituição, a matriz apresentou baixa reatividade e um consumo elevado de portlandita valores de 93,4% aos 28 dias, a porosidade da matriz foi reduzida com a substituição do cimento. O compósito apresentou um melhor comportamento mecânico aos 28 dias com o reforço de fibra de coco e substituição do cimento por cinza de casca de arroz. A Figura 9 apresenta os valores de tensão deformação específica do compósito com e sem envelhecimento acelerado.

Figura 12 – Curvas tensão deformação específica do compósito, (A) aos 28 dias; (B) 28 dias em banho térmico.



Fonte: Pereira, *et al.* (2013)

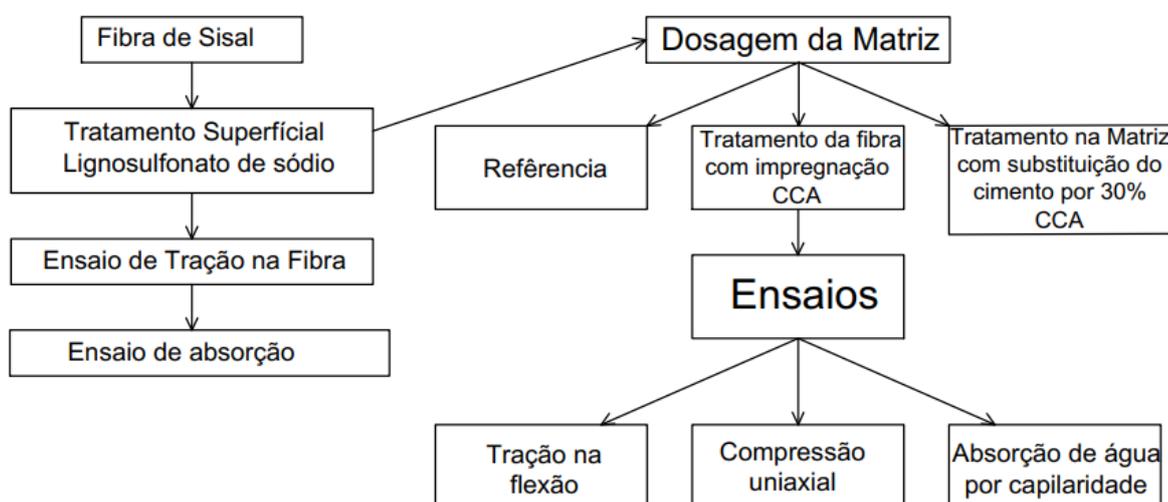
Wei, Meyer (2016) estudaram a durabilidade da fibra de sisal em compósito cimentício através da substituição do cimento por sílica de casca de arroz e aditivos minerais adicionados a cinza, de modo distinguir a atividade pozolânica e a eficiência da cinza de casca de arroz. A preservação da fibra foi melhorada quando ocorreu a

substituição do cimento por cinza de casca de arroz. Os corpos de prova foram submetidos a ciclos de umedecimento e secagem em temperatura elevada, para que a deterioração da matriz e fibra acontecesse. Os resultados da flexão dos compósitos cimentício mostram que o comportamento dúctil da matriz reforçada com fibra de sisal melhora consideravelmente com o aumento das propriedades mecânicas causado pela substituição da cinza. Esse aumento foi atribuído a: (i) as reações pozolânicas entre cinza e cimento formando hidratos de silicato de cálcio reduzindo a alcalinidade, dando mais rigidez à matriz, (ii) melhores propriedades de ligação entre fibra matriz, devido a redução da zona de transição.

3 PROGRAMA EXPERIMENTAL

Neste capítulo, serão definidos os materiais e os métodos adotados para a análise do estudo em questão, bem como a caracterização e os procedimentos da pesquisa. Para uma melhor compreensão de como se desenvolverá da pesquisa, o organograma abaixo representa a organização do estudo, seguindo uma sequência que permita o melhor aproveitamento dos recursos.

Figura 13 – Organograma para realização da pesquisa



Fonte: (Elaboração própria)

3.1 Materiais Utilizados

Nestes itens estão descritos todos os materiais utilizados para a fabricação das matrizes cimentícias utilizadas neste trabalho. Também se encontra a descrição da fibra utilizada e algumas de suas características físicas e mecânicas. Na sequência, são fornecidos os quantitativos de materiais que compõe o traço utilizado neste estudo.

3.1.1 Cimento

O cimento Portland usado na dosagem é o CP-V doado gentilmente pela empresa RITT concretos e Pré-moldados LTDA. Esse tipo de cimento é utilizado na fabricação de piso polido e comercializado pela empresa.

A escolha deste cimento teve como objetivo avaliar a agressividade mediante a inserção da fibra de sisal, pois o mesmo apresenta alto grau de degradação em compósitos cimentícios reforçado com fibra orgânica.

3.1.2 Lignosulfonato de sódio

Os lignosulfonatos são obtidos como um subproduto do processo de polpação da madeira. Dependendo do tipo de processo de polpação, e qual o tipo de matéria orgânica é extraído, diferentes lignossulfonatos podem ser obtidos. O lignosulfonato utilizado é da empresa Auros Química Industria E Comercio Ltda. As especificações estão listadas na Tabela 2.

Tabela 2 Composição química do lignosulfonato de acordo como fabricante

Código:	1130-A			
Produto:	LIGNOSULFONATO DE SÓDIO			
Aspecto:	PO MARROM			
Descrição ONU:	PRODUTO NÃO PERIGOSO.			
CAS Number:	8061-51-6			
Grau Técnico:	N/A			
Cód. Ensaio	Nome Ensaio	U.M.	Mínimo	Máximo
00234	Aparência		Pó Marrom	
00196	Sulfato de Sódio	%	<<<	5,00
00156	Materiais Insolúveis	%	<<<	0,30
00155	Cálcio (Ca)	%	<<<	0,60
00086	pH		7,5	9,1

Fonte: Auros Química Industria e Comercio Ltda (2022)

3.1.2 Agregado miúdo (areia)

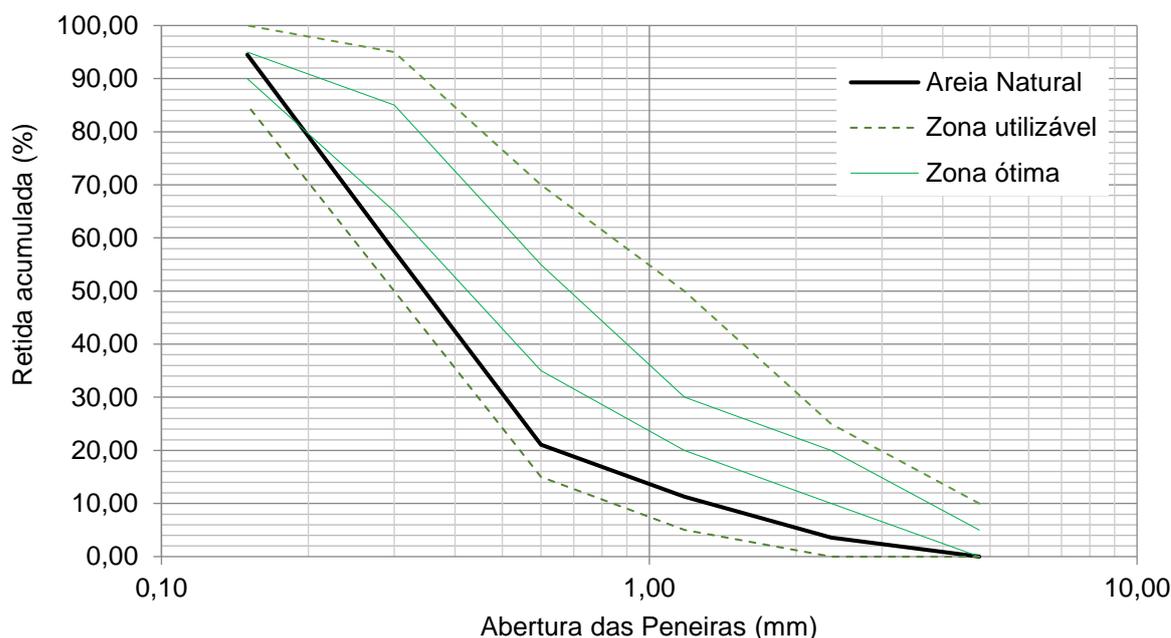
O agregado miúdo utilizado é proveniente do leito do rio Ibicuí, mais precisamente da região da Manoel Viana. O agregado foi submetido aos ensaios de caracterização e os resultados estão listados na Tabela 3. A curva granulométrica foi obtida de acordo com a NBR ABNT 7211 (Agregados para concretos - Especificação, 2005), e pode ser visualizada na Figura 14. A massa unitária foi determinada segundo a NBR NM 45 (2006) e a massa específica pela NBR NM 52 (2009).

Tabela 3 – Caracterização do agregado miúdo (areia)

Aberturas das Peneiras (mm)	% Retida	% Retida Acumulada
4,75	0	0
2,36	3,6	3,6
1,18	7,7	11,3
0,6	9,9	21,1
0,3	36,3	57,5
0,15	37,1	94,5
Fundo	5,5	100
TOTAL	100	-
	Módulo de finura	1,88
	Dimensão máxima característica (mm)	2,4
	Massa Unitária (kg/dm ³)	1,32
	Massa específica (kg/dm ³)	2,64

Fonte: Elaboração própria

Figura 14 – Curva granulométrica do agregado miúdo (areia)



Fonte: Elaboração própria

3.1.3 Agregado graúdo (brita)

Nesta pesquisa, foram utilizadas duas granulometrias de britas basálticas (brita 0 e brita 1). As britas passaram por limpeza prévia, onde foram depositadas sobre uma peneira com uma malha menor que o diâmetro da brita, e submetida a água

corrente, no qual todos os resíduos que estejam aderidos nos grãos da pedra britada fossem removidos. Após esse processo, a brita foi seca em temperatura ambiente para que a umidade fosse removida. A composição granulométrica foi realizada segundo a NBR 17054 (2022), e estão contidas na Tabela 4 referente a brita 0 e Tabela 5 referente a brita 1. Para melhor visualização, a Figura 15 mostra a curva granulométrica das duas britas.

Tabela 4 – Caracterização do agregado Graúdo Brita 0

Aberturas das Peneiras (mm)	% Retida	% Retida Acumulada
19	0	0
12,5	0	0
9,5	3	3
6,3	62,4	65
4,75	29,5	95
2,36	5	100
Fundo	0,1	100
TOTAL	100	
Módulo de finura		5,97
Dimensão máxima característica (mm)		9,5
Massa unitária (kg/dm ³)		1,41
Massa específica (kg/dm ³)		2,75

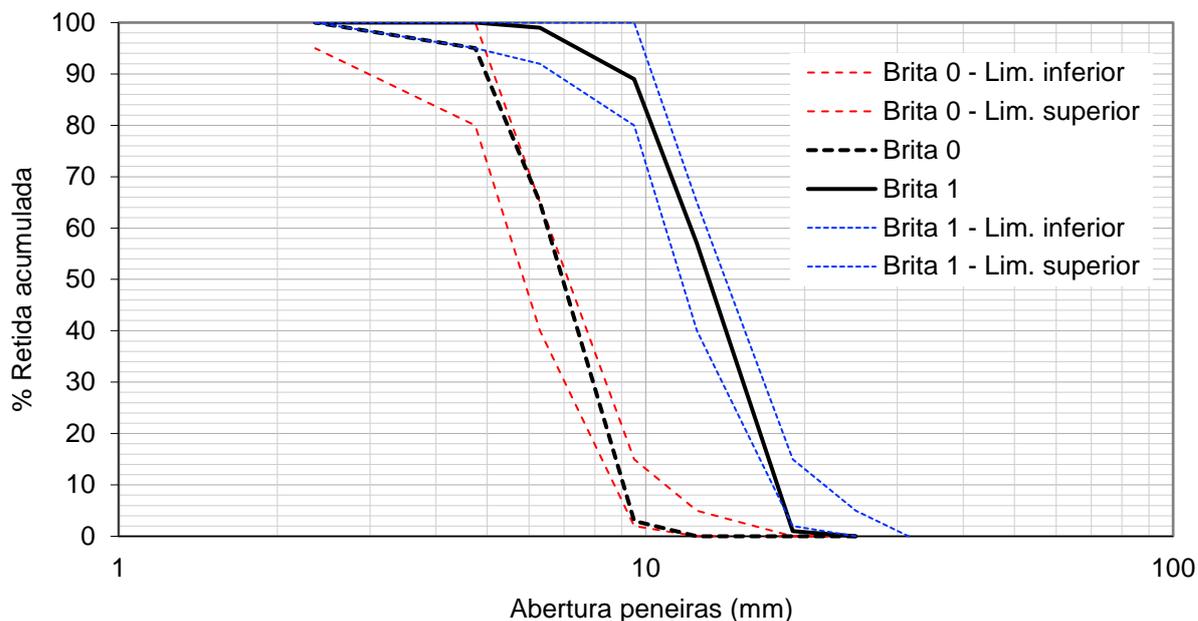
Fonte: Elaboração própria

Tabela 5 – Caracterização do agregado Graúdo Brita 1

Aberturas das Peneiras (mm)	% Retida	% Retida Acumulada
19	1,1	1
12,5	56,3	57
9,5	31,9	89
6,3	9,7	99
4,75	0,6	100
2,36		100
Fundo		100
TOTAL	100	
Módulo de finura		9,5
Dimensão máxima característica (mm)		19
Massa unitária (kg/dm ³)		1,46
Massa específica (kg/dm ³)		2,81

Fonte: Elaboração própria

Figura 15 – Curva granulométrica dos agregados graúdos



Fonte: Elaboração própria

3.1.4 Cinza de casca de arroz

A adição pozolânica utilizada será a cinza de casca de arroz, um produto que surgir da cadeia produtiva do arroz, proveniente da queima descontrolada da casca do arroz.

Abundante na região de Alegrete e de fácil aquisição o uso da cinza de casca de arroz tem grande destaque dentro da (UNIPAMPA) – Universidade Federal do Pampa. O interesse nesse resíduo se dá em razão do efeito físico e químico provocado pelas adições reativas como as pozolanas, que atuam na redução da porosidade capilar conduzindo a uma maior resistência do concreto. Deste modo e pela abundância da mesma, a cinza será utilizada como substituição parcial do cimento em 30% do CPV. Outra alternativa é utilizar a CCA como tratamento superficial concomitante ao lignosulfonato com o intuito de preservar a fibra.

A Cinza utilizada foi adquirida através do grupo Pilecco Nobre e Sílica Verde do Arroz Ltda., da cidade de Alegrete/RS, com densidade de 2,03 g/cm³ (fornecida pela empresa). A composição química da cinza de casca de arroz estão descritas na tabela 6.

Tabela 6 – Composição química da cinza da casca de arroz.

Cinza de casca de arroz	
Elemento	% em massa
Óxido de silício - SiO ₂	92,777
Óxido de potássio - K ₂ O	1,888
Pentóxido de fósforo - P ₂ O ₂	0,704
Óxido de cálcio - CaO	0,673
Dióxido de manganês - MnO	0,38
Cloro - Cl	0,275
Óxido sulfúrico - SO ₃	0,091
Óxido de ferro - Fe ₂ O ₃	0,055
Óxido de európio (III) - Eu ₂ O ₃	0,036

Fonte: Cardoso (2022)

3.1.5 Fibra de Sisal

O sisal desta pesquisa foi doado pelo engenheiro agrônomo Marcos Rodrigues, que atua no cultivo da planta agave sisalana na região de Conceição do Coité-BA. Por serem fibras naturais, possuem tamanhos variados em relação ao seu comprimento e diâmetro.

Para sua utilização no compósito, as fibras foram cortadas com tesoura no comprimento de 40 mm seguindo o estudo de Silva (2009), onde se obteve resultados satisfatórios quanto comparado a comprimentos inferiores de ancoragem da fibra na matriz. Em seguida, as fibras foram lavadas com água corrente e secas em temperatura ambiente como ilustrado na Figura 16. Após esse processo as mesmas foram submetidas a um tratamento de imersão por 1 hora em uma solução contendo água e 4% de lignosulfonato de sódio (calculado em função da massa de fibras de sisal). Esta quantidade foi escolhida de acordo com o estudo realizado por Gualberto (2020), em que os resultados evidenciam que compósitos com impregnação com 4% de lignosulfonato apresentaram melhor desempenho quanto a resistência à flexão, uma melhora na absorção de água comparada a fibra sem tratamento além de apresentar uma melhora na tenacidade do compósito. As fibras impregnadas, mantiveram a integridade em ambiente alcalino em idades avançadas. Além do tratamento das fibras com apenas lignosulfonato, uma outra parcela de fibras foi tratada com a mesma solução, porém adicionando-se à solução 5% de CCA em

função da massa de fibra utilizada na mistura. A Figura 17 mostra as fibras submetidas aos diferentes tratamentos.

Figura 16 – Fibras Utilizadas na mistura



Fonte: Elaboração própria

Figura 17 – Fibras em tratamento em solução com lignosulfonato (a) e lignosulfonato e cinza da casca de arroz (b).



Fonte: Elaboração própria

3.1.5.1 Ensaio de Tração na fibra

O ensaio de tração na fibra foi realizado no Laboratório de Metalografia, tratamentos térmicos e ensaios mecânicos, executado em uma máquina ensaios mecânicos Shimadzu, modelo AGS-X, como pode ser visualizado na Figura 18, a mesma utiliza uma célula de carga com capacidade de 500 N. Os filamentos de fibra foram ensaiados a uma velocidade de 1 mm/min.

Figura 18 – Máquina de ensaio Shimadzu modelo AGS X

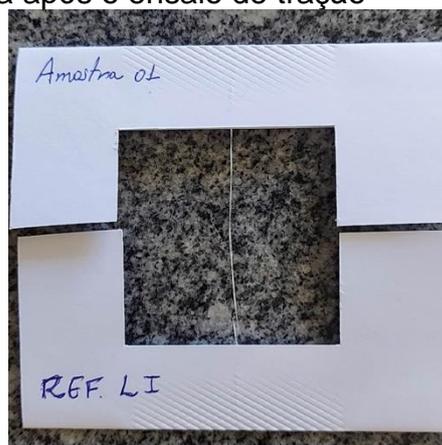


Fonte: Elaboração própria

Para determinação dos parâmetros de resistência da fibra, seguiu-se a metodologia da ASTM C1557 (2020), onde um filamento de fibra é posicionado em um molde de papel cartão e fixado ao papel com fita crepe, proporcionando o alinhamento em relação à máquina, e garantindo a aderência entre a amostra e as garras que fazem o travamento, evitando assim prováveis escorregamentos. As amostras foram divididas como seus grupos de tratamento, isto é, **REF-LI** (fibras tratadas apenas com lignosulfonato) e **LI-CCA** (fibras tratadas com lignosulfonato e cinza da casca de arroz).

Na Figura 19, é possível visualizar um filamento de fibra após o ensaio de tração. Cada filamento de 80 mm de comprimento foi mantido confinado no papel cartão. Após o posicionamento da amostra na máquina, foram efetuados os cortes na lateral do papel, para que somente a fibra fosse tracionada, obtendo-se, assim, o valor de tração na fibra.

Figura 19 – Filamento de fibra após o ensaio de tração



Fonte: Elaboração própria

Para melhor controle dos resultados foram realizados 30 ensaios, divididos igualmente em 10 amostras para cada grupo de filamento, ou seja, fibra sem tratamento, fibra impregnada com lignosulfonato (**REF-LI**), e fibra com impregnada com lignosulfonato e cinza de casca de arroz (**LI-CCA**). Cada filamento de fibra tratada e sem tratamento foi submetido ao ensaio de tração direta. Na Tabela 6 são mostrados os dados obtidos para deslocamento e força médios, máximos e mínimos, desvio padrão e coeficiente de variação.

Tabela 7 – Valores médios do ensaio de tração direta nas fibras tratadas e sem tratamento

	FIBRA REF-LI		FIBRA LI-CCA		FIBRA SEM TRAT.	
	Deslo. Ruptura (mm)	Força na Ruptura (KN)	Deslo. de Ruptura (mm)	Força na Ruptura (KN)	Deslo. de Ruptura (mm)	Força na Ruptura (KN)
Média	2,526	9,63	4,127	14,54	3,647	18,23
Mínimo	1,234	4,867	1,984	9,960	1,351	3,040
Máximo	4,184	17,75	6,067	24,15	5,401	46,84
Des. Padrão	0,749	3,62	1,348	3,94	1,293	14,15
Coef. Variação	29,66%	37,57%	32,66%	27,10%	35,45%	77,62%

Fonte: Elaboração própria

Os resultados obtidos à tração direta para todas as amostras de fibra, tratadas e não tratadas apresentam variabilidade devido à variação da forma da seção transversal das fibras de sisal. Silva (2009) afirma que o diâmetro das fibras é inconstante e, com isso, podem apresentar diferentes comportamentos. Dessa forma, optou-se por realizar uma seleção dos dados de força e deslocamento, removendo

aqueles que apresentaram distorções e valores. Os dados tratados são apresentados na Tabela 11.

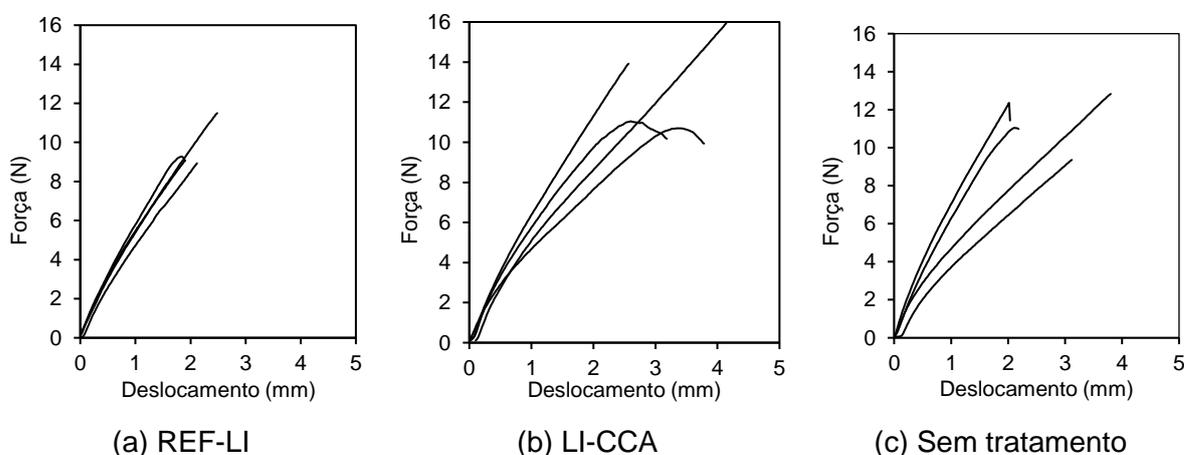
Tabela 8 – Valores médios corrigidos para o ensaio de tração na fibra com e sem tratamento algum

	FIBRA REF-LI		FIBRA L-+CCA		FIBRA SEM TRAT.	
	Deslo. de Ruptura (mm)	Força na Ruptura (KN)	Deslo. de Ruptura (mm)	Força na Ruptura (KN)	Deslo. de Ruptura (mm)	Força na Ruptura (KN)
Média	2,384	9,69	3,824	12,40	3,542	11,38
Mínimo	2,117	8,929	2,784	9,960	2,634	9,360
Máximo	2,684	11,50	4,617	16,38	4,517	12,86
Desvio Padrão	0,251	1,05	0,882	2,40	0,939	1,34
Coef. Variação	20,53%	10,83%	23,08%	19,34%	26,51%	11,78%

Fonte: Elaboração própria

Ao analisar os valores médios que é apresentado na Tabela 11, notasse que as fibras não apresentam grandes alterações quando a carga máxima de ruptura, com isso os tratamentos utilizados nas fibras não foram capazes de modificar suas propriedades mecânicas. 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 obteve um valor de 10,28 N para a fibra. A Figura 23 apresenta os gráficos com alguns dos resultados dos ensaios feitos com cada filamento de fibra tratada e sem tratamento.

Figura 20 – Ensaio de tração nas fibras



Fonte: Elaboração própria

3.1.5.2 Absorção de água na fibra tratada

O ensaio de absorção de água das fibras foi realizado no intuito de auxiliar na análise da eficácia dos tratamentos. Esse ensaio é de extrema importância visto que Toledo filho (2009), em suas pesquisas, verificou que as fibras sofrem ataques por dois agentes em meio alcalino. Neste sentido, caso a fibra absorva a água da matriz, pode haver a decomposição química da lignina e da hemicelulose na lamela média, o que ocasiona a quebra da ligação entre as fibras individuais, inibindo que a fibra possa reforçar a matriz. Na segunda possibilidade, pode haver a cristalização da cal no lúmen, nas paredes das fibras individuais e na lamela média, causando uma diminuição na flexibilidade na capacidade de carga da fibra.

A metodologia utilizada seguiu o proposto por Toledo filho (1997), onde pequenas quantidades de amostras da fibra são submersas em água por um período de 1 hora para a saturação total. Para melhor controle do ensaio, a temperatura do ambiente foi mantida em 23 °C. A absorção da fibra é calculada de acordo com a Equação 1.

$$IA = P_{um} - P_{est} \quad \text{Equação 1}$$

Onde:

IA - Absorção da fibra (%);

P_{um} - Peso úmido da amostra (g);

P_{est} - Peso da amostra seca (g);

Para tanto, o ensaio foi dividido em três leituras, conforme segue:

- Leitura 1: As fibras foram secas em estufa a 60°C e esfriada a temperatura ambiente, logo em seguida foram submetidas a imersão total em água por 1 hora, a uma temperatura constante de 23°C. Após isso, determinou-se a massa úmida. Em seguida foram levadas a estufa a uma temperatura de 60°C para que fossem secas novamente.
- Leitura 2: As mesmas fibras passaram novamente pelo processo de saturação e secagem em estufa como descrito anteriormente na Leitura 1. Afim de se obter a valor de saturação novamente da fibra.
- Leitura 3: Na leitura 3 repetiu-se o processo, obtendo-se três valores para as fibras na condição saturada e seca.

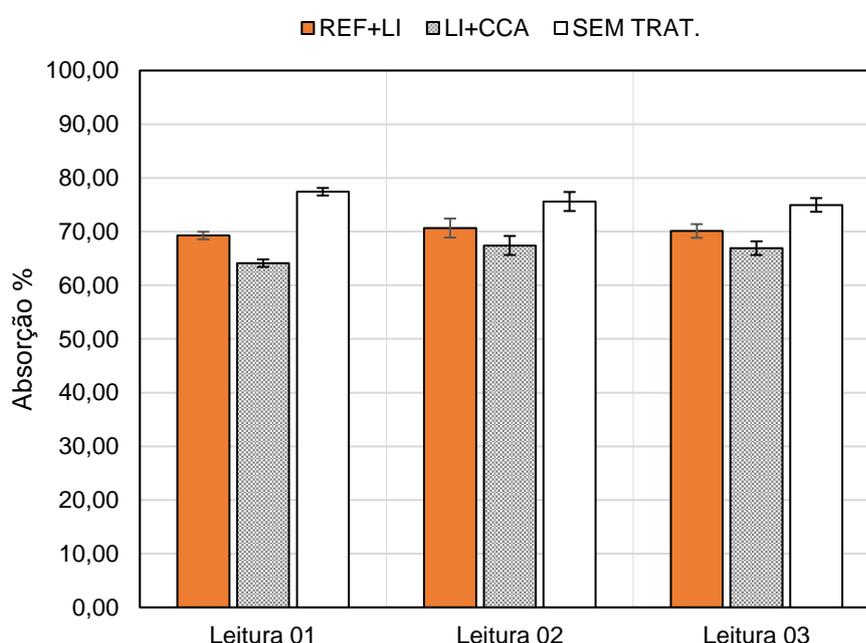
A Figura 22 apresenta um histograma com os resultados médios obtidos em cada leitura, enquanto a Tabela 9 mostra os resultados médios de absorção entre as diferentes leituras. Como resultado, verifica-se que as fibras sem tratamento obtiveram um IA médio de 75,99%. Para as fibras com o tratamento de 4% de lignosulfonato (REF-LI) obteve-se IA médio de 70,1%. Já as com o lignosulfonato e a cinza de casca de arroz (LI-CCA), a absorção média foi de 66,17%. É possível notar que as fibras com lignosulfonato apresentaram uma diminuição na absorção quando comparado as fibras sem tratamento. A média de absorção reduz ainda mais quando adicionado CCA ao tratamento. Assim, os filamentos tratados com lignosulfonato e cinza de casca de arroz (LI-CCA) apresentaram o melhor comportamento quanto a absorção em comparação a fibra sem tratamento. Cardoso (2014) verificou que as fibras com tratamento polimérico à base de EPS e SCA, obtiveram diminuição no índice de absorção em cerca de 70% em comparação as fibras sem tratamento. Vale ressaltar que a natureza hidrofóbica do composto apolar do polímero utilizada no estudo influenciou diretamente no índice de absorção, ou seja, os materiais hidrofóbicos tem a habilidade de formar de uma membrana sobre a superfície em contato, ocasionado um menor índice de absorção.

Tabela 9 – Valores médios de absorção de água pelas fibras

Índice de absorção (%)			
Corpo de prova	Média	Desvio padrão	Coef. De Variação
REF+LI	70,01	0,70	1,00%
LI+CCA	66,15	1,77	2,68%
SEM TRAT.	75,99	1,28	1,68%

Fonte: Elaboração própria

Figura 21 – Valores de absorção de água pelas fibras



Fonte: Elaboração própria

As fibras sem tratamento apresentaram uma leve tendência de redução entre leituras, o que pode ser explicado pelo mesmo comportamento obtido por Ferreira (2012). Em seu trabalho, as fibras passaram por um processo de 10 ciclos de molhagem e secagem, ocorrendo uma variação no índice de absorção das fibras, onde os filamentos que passaram pelos ciclos, apresentaram uma diminuição de 30% do índice de absorção.

Mesmo que as fibras apresentem baixa absorção, não é possível afirmar que o processo de degradação não ocorrerá. Toledo filho *et al.* (2009) afirma que a degradação da fibra orgânica pode acontecer pela decomposição química da lignina e da hemicelulose na lamela média, ou ainda pela cristalização da cal no lúmen nas paredes das fibras individuais como descrito no item 2.3.3, causando uma diminuição

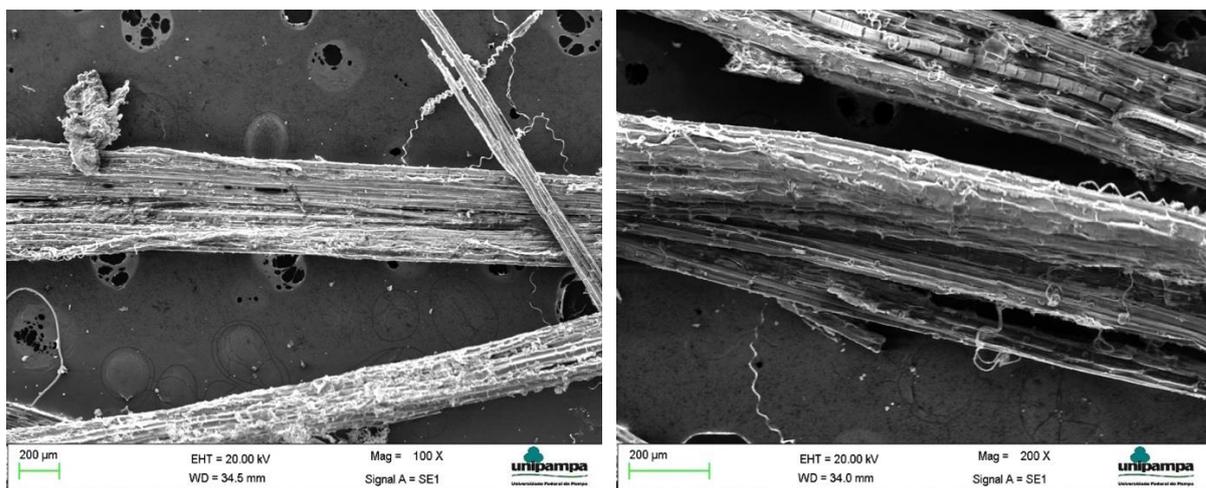
na flexibilidade e a perda de resistência da fibra. Tais fenômenos podem ocorrer devido a migração dos líquidos que fazem a hidratação do cimento no interior da matriz, e são absorvidos pela fibra, causando assim a perda do elemento de reforço no compósito.

3.1.5.3 Análise microscópica das fibras através do MEV

As fibras de sisal foram submetidas ao ensaio de análises no Microscópio Eletrônica de Varredura (MEV) afim de verificar a deposição do tratamento em que foram submetidas. As análises foram realizadas utilizando o microscópio modelo MEV, modelo MA-10, marca Zeiss, laboratório de Imagens da Unipampa, Campus Alegrete/RS.

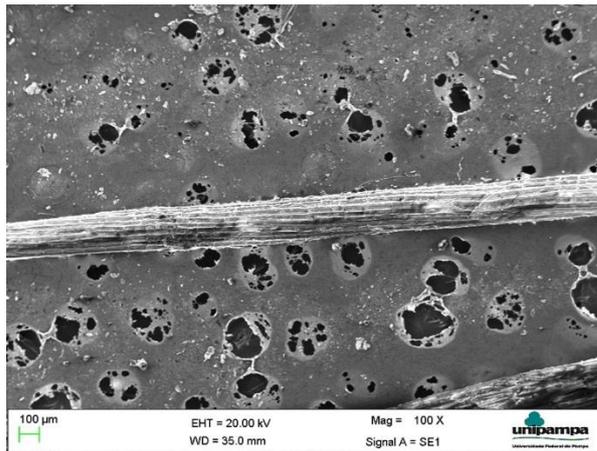
Antes das análises, as amostras foram preparadas e cortadas de modo que fossem acomodadas ao suporte do microscópio. Após essa etapa as amostras eram mantidas secas e sem umidade. As fibras foram então depositadas nos suportes contendo fita adesiva de carbono e foram recobertas com uma fina camada de ouro. A Figura 21 apresenta a análise microscópica dos filamentos de sisal tratadas e sem tratamento.

Figura 22 – Análises microscópica das fibras de sisal tratadas e sem tratamento.

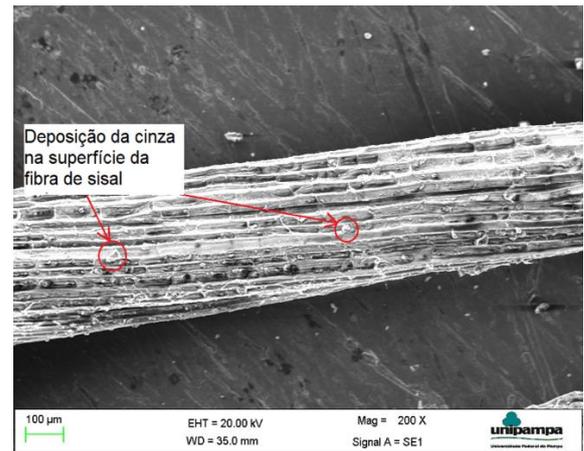


(a) tratamento com lignosulfonato (100x)

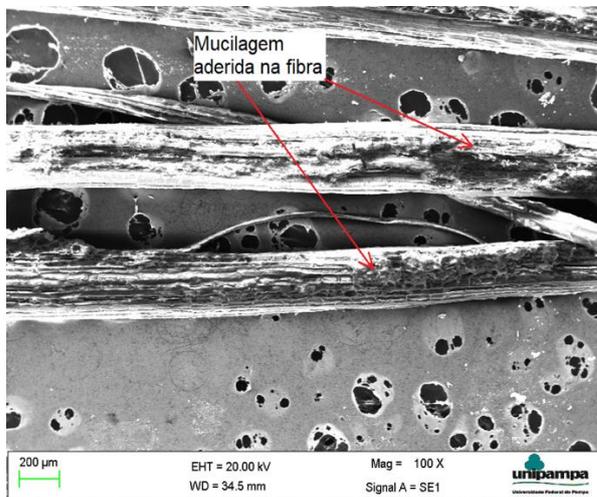
(b) tratamento com lignosulfonato (200x)



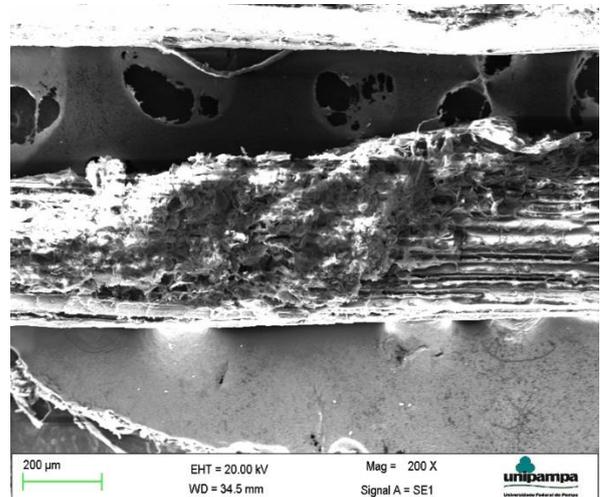
(c) tratamento com lignosulfonato e CCA (100x)



(d) tratamento com lignosulfonato e CCA (200x)



(e) sem tratamento (100x)



(f) sem tratamento (200x)

Fonte: Elaboração própria

Observa-se, a partir da Figura 21 (a), os filamentos de fibra que passaram pelo tratamento com lignosulfonato em um teor de 4%. Devido ao alto teor de solubilidade do lignosulfonato em água, não foi possível visualizar a deposição do mesmo na superfície da fibra com a ampliação de 100X. Assim, na Figura 21 (b) com uma ampliação em 200X, nota-se que existe uma irregularidade superficial, o que pode ser possivelmente associado a deposição do lignosulfonato na superfície da fibra.

A Figura 21 (c) e (b) mostram as fibras tratadas com lignosulfonato e cinza da casca de arroz. As fibras foram tratadas com 4% lignosulfonato como na pesquisa de Gualbeto 2020 e 5% de cinza de casca de arroz seguindo o tratamento realizado por Noronha *et al.* (2021). O uso da cinza de casca de arroz na solução visa promover na superfície da fibra um micro camada de silicato de cálcio hidratado, buscando manter a integridade da fibra no ambiente alcalino da matriz cimentícia. A Figura 21 (c) com resolução de 100X ilustra pequenas distorções no envolto da fibra, essas distorções

podem ser associadas a cinza de casca de arroz que foram aderidas a fibra por meio da solução aquosa de lignosulfonado, onde a solução manteve a cinza na superfície da fibra com um efeito cola. Na resolução de 200X conforme Figura 21 (d), pode ser visualizado que de fato ocorreu a aderência da cinza na fibra. Na imagem está destacado os micros grãos de cinza que foram depositados na fibra.

Na Figura 21 (e) e (f), é possível visualizar os filamentos que não passaram por qualquer tratamento inicial. Logo esses filamentos não foram limpos inicialmente como as que antecederam o tratamento com lignosulfonato. Nas imagens é possível observar pontos de mucilagem do processo de desfibrilamento que ficam aderidas na fibra, o que pode vir a interferir na interação da fibra-matriz, ocasionando perda de aderência da fibra com a matriz. Assim, evidencia-se a necessidade de limpeza prévia da fibra para uso em matrizes cimentícias.

Por meio das imagens, observou-se que os filamentos das fibras de sisal possuem seção transversal arredondada, com diâmetro variável, apresentando valor médio de 274,3 μm . Esse valor está condizente com o obtido por Spinacé (2011) de 235 μm e por Fidelis (2014) de 278,7 μm . Contudo, é importante destacar que é muito difícil obter um valor fixo para qualquer uma das diversas propriedades das fibras naturais, como densidade, diâmetro, área de seção transversal, resistência à tração, o que pode ser explicado pela irregularidade das fibras. Segundo Silva (2009), as fibras de sisal dispõem de uma estrutura hierárquica com morfologia variável, possuindo seção transversal irregular.

3.2 Especificação do traço

A Tabela 10 apresenta o traço unitário usado pela empresa RITT concretos e Pré-moldados LTDA, e na Tabela 10 estão contidos os consumos dos materiais para 1 m^3 de concreto. Para a nomenclatura dos compósitos moldados, a seguinte descrição foi adotada: **REF-LI**, refere-se a matriz de referência com fibras impregnação em solução com 4% de lignosulfonato de sódio; **LI-CCA**, refere-se a matriz com fibras impregnadas em solução de 4% de lignosulfonato mais cinza de casca de arroz; e, **LI-MCCA**, refere-se a matriz com fibras impregnadas em solução com 4% de lignosulfonato de sódio, com substituição parcial do cimento por 30% cinza de casca de arroz. A quantidade de 1% de fibras vegetal de sisal em relação ao volume de concreto foi acrescentada aos traços. Vale ressaltar que quantidades de

até 3% foram testadas para o referente traço, porém a mistura apresentou a formação e grumos de fibras e segregação. Assim, o valor 1% de fibras foi utilizado, pois apresentou melhor consistência e homogeneidade a mistura.

Tabela 10 – Traço unitário em massa disponibilizado para a dosagem do estudo

Cimento	Areia Natural	Brita 0	Brita 1	a/c
1,00	1,75	1,77	0,80	0,53

Fonte: RITT concretos e Pré-moldados LTDA (2022)

Tabela 11 – Quantitativo de material para 1m³ de concreto.

Composição	REF-LI	LI-CCA	LI-MCCA
Cimento (kg/m ³)	395	395	276,5
Agregado Miúdo (kg/m ³)	690	690	690
Agregado Graúdo 01* (kg/m ³)	700	700	700
Agregado Graúdo 02* (kg/m ³)	315	315	315
Cinza de Casca de arroz (kg/m ³)	–	–	118,5
Água (L)	210	210	210
Fibra de Sisal com lignosulfonato (%)	1,0	–	1,0
Fibra de sisal com lignosulfonato e CCA (%)	–	1,0	–

Agregado Graúdo 01* = Brita 1
Agregado Graúdo 02* = Brita 0

Fonte: (Elaboração própria)

3.2.1 Processo de Mistura

A dosagem do compósito seguiu uma sequência definida, sendo o passo inicial a limpeza superficial da fibra com água corrente. O preparo da fibra seguiu da seguinte forma: lavagem das fibras com água em temperatura ambiente, e posteriormente secagem em estufa em temperatura constante de 60°C por 24 horas. Após este processo, as fibras foram imersas na respectiva solução por 1 hora e drenadas em temperatura ambiente (aprox. 24°C e umidade 60%) para garantir que as fossem inseridas na matriz na condição saturada superfície seca.

Durante testes preliminares, foi verificado a necessidade de adicionar 400 ml de água ao traço fornecido pela empresa. Cabe ressaltar que a incorporação de fibras

reduz a trabalhabilidade do concreto e que nenhum aditivo superplastificante foi utilizado, justificando a necessidade do aumento do consumo de água para todos os traços. Assim, a relação água-aglomerante foi alterada para 0,548.

Os corpos de prova foram moldados no laboratório da universidade Federal do Pampa, mais precisamente no Laboratório de Estruturas e Materiais de Construção (LEMAC), com o auxílio de uma betoneira de 90 L. A mistura dos concretos seguiu a ordem estabelecida por Castoldi (2018) para utilização de fibras, onde a seguinte sequência foi executada:

- 1 - Mistura dos agregados (brita e areia) com 70% da água do traço por 1 minuto;
- 2 - Inserção de toda a adição mineral determinada no traço (sílica de casca de arroz, quando houver);
- 3 – Inserção do cimento na mistura e dada continuação por mais 1 minuto, onde se obteve maior homogeneidade;
- 4 - Adição da água restante (30%) no traço dando continuidade à mistura por mais 10 minutos, obtendo-se uma mistura homogênea.
- 5 - Adição das fibras tratadas com porções de que não ultrapassem $\frac{1}{4}$ do total do seu volume. Após a inserção de toda a porcentagem fibra, deu-se continuidade na mistura por mais 5 minutos mantendo a consistência e homogeneidade da mistura final.

Antes da moldagem dos corpos de prova, foi realizado o teste de abatimento do tronco de cone (*slump test*) de acordo com a NBR NM67 (1996). Foram obtidos valores de *slump* de 70 mm, 50 mm e 70 mm para as misturas REF-LI, LI-CCA e LI-MCCA, respectivamente.

3.2.3 Procedimento de moldagem e cura

A moldagem dos corpos de prova foi realizada após o tempo de mistura, no qual, após preenchidos dos moldes, os corpos de prova foram adensados através da mesa vibratória por 10 segundos. A Tabela 11 mostra as normas específicas para cada ensaio, as dimensões e quantidade de corpos de prova (CP) moldados. Posteriormente, os corpos de prova foram submetidos a cura submersa em água até a data de ensaio respectiva, também indicada na Tabela 11.

Tabela 12– Descrição da metodologia e ensaios

Ensaio	Norma NBR	Dim. CP (cm)	Nº CPs	Idade de ensaio (dias)
Ensaio de tração na flexão	12142 (2010)	10x10x40	6	14 e 28
Compressão Uniaxial	5739 (2018)	10x20	6	14 e 28
Absorção de água por capilaridade	9779 (2013)	10x20	9	28

Fonte: Elaboração própria

3.2.4 Ensaios de compressão e tração na flexão.

A resistência à compressão das amostras cilíndricas foi obtida de acordo com a NBR 5739 (2018). Os corpos de prova foram ensaiados em uma máquina de ensaios mecânicos EMIC Linha DL 2000 com carga máxima de 1500 KN. A Figura 23 (a) apresenta o ensaio de compressão uniaxial sendo realizado em uma amostra do traço REF-LI. O comportamento da matriz na tração foi avaliado por um ensaio de tração na flexão a quatro pontos segundo a NBR 12142 (ABNT, 2010).

Para realização dos ensaios, foram moldados 6 corpos de prova por traço, com dimensões conforme Tabela 11, no qual cada grupo de 3 corpos de prova foi destinado a realização do ensaio aos 14 e 28 dias, respectivamente. Para moldagem dos concretos, o adensamento se deu através da mesa vibratória por 10 segundos. A desforma ocorreu após 24 horas da moldagem. Os corpos de prova foram mantidos em câmara úmida até as idades de controle.

Para realização do ensaio de tração na flexão, os roletes de apoio foram posicionados na parte inferior da máquina, e em seguida o corpo de prova foi colocado sobre os mesmos, a 25 mm das bordas e com distância entre eixos de 350 mm. Os ensaios foram realizados em uma máquina EMIC Linha DL 2000 com carga máxima de 200 KN. Os roletes de aplicação da carga foram posicionados na célula de carga da máquina e dado prosseguimento ao ensaio. Na Figura 23 (b) é ilustrado o ensaio de tensão na flexão de quatro pontos em execução.

Para obtenção das curvas carga (KN) versus deslocamento (mm), no intuito de compreender melhor o comportamento do concreto devido à adição das fibras de sisal, foi posicionado um LVDT de modo a se obter as deformações. O ensaio ocorreu a uma velocidade de carregamento de 2,0 mm/min.

Figura 23 – Ensaio mecânicos nos corpos de prova de concreto.



(a) Compressão axial

(b) Tração na flexão (4 pontos)

Fonte: Elaboração própria

3.2.6 Absorção de água por capilaridade

O Ensaio de capilaridade seguiu os preceitos da NBR 9779 (2013), onde determina-se a absorção de água em concretos e compósitos, através da ascensão capilar. Para o ensaio, foram moldados três copos de prova cilíndricos com dimensões de 10 x 20 cm para cada traço do estudo. As amostras foram mantidas em câmara úmida até a idade de controle (28 dias). Após o período de cura, os copos de prova foram mantidos em estufa por 24 horas a uma temperatura constante de 60°C, até que atingisse constância em massa.

A determinação da absorção consiste em submeter uma das faces do corpo de prova sob uma lâmina de água de 5 mm, e a determinação da massa nos intervalos de 3, 6, 24, 48, 72 horas a partir do contato inicial do corpo de prova com a lâmina de água. Através da razão entre a diferença de massa nos intervalos de tempo menos a massa do corpo de prova seco, dividido pela área da seção transversal da amostra, obtém-se a absorção de água por capilaridade expressa em (g/cm²).

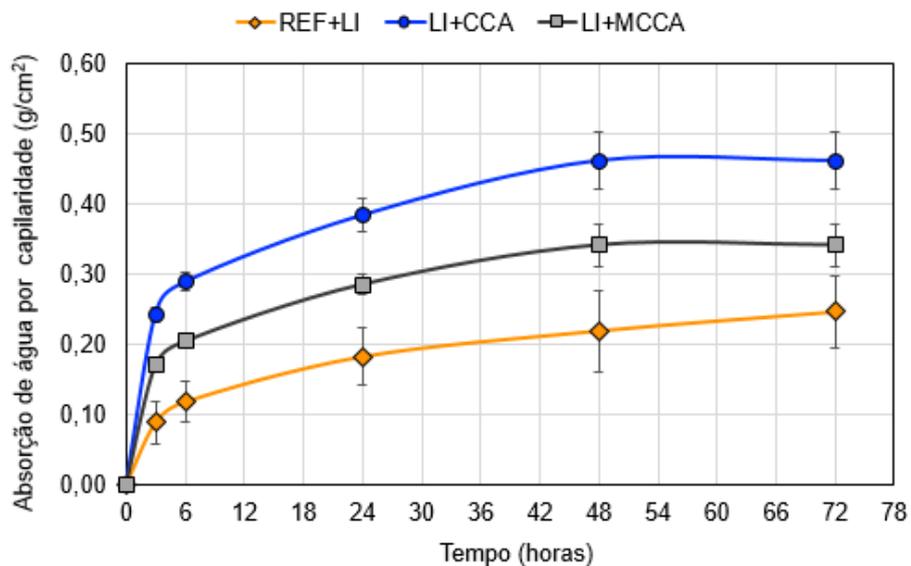
4 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste capítulo será apresentado os resultados referentes aos experimentos em conjunto com as análises e interpretação dos dados da pesquisa.

4.1 Absorção de água por capilaridade dos concretos

Na Figura 24 são apresentados os valores médios de absorção de água por capilaridade em função do tempo no compósito na idade de 28 dias. Este ensaio visa avaliar a facilidade com que o concreto absorve água por este mecanismo de transporte. A absorção capilar ocorre rotineiramente em estruturas de concreto, tanto naqueles elementos estruturais em contato direto com a umidade ou parcialmente imersos em água, como naqueles onde ocorrem ciclos de secagem e molhagem. O ensaio a absorção de água ocorre através dos poros capilares do concreto, pela face inferior da amostra, ou ainda pelo perímetro em contato com a lâmina de 5 mm de água.

Figura 24 – Índice de absorção médio de água em função do tempo



Fonte: Elaboração própria

Através do gráfico, é notório que o tratamento com CCA na fibra e na matriz não foi capaz de reduzir o índice de absorção dos compósitos LI+CCA e LI+MCCA. Esse aumento na absorção pode estar relacionado aos caminhos de percolação de água entre a fibra e a matriz. Pode-se destacar ainda que o compósito com substituição do

cimento Portland por cinza de casca de arroz produz uma pasta de cimento mais densa, onde as micropartículas da cinza com diâmetro em torno de 0,1 μm se aloca entre as partículas de cimento, ocupando a posição dos poros diminuindo o fluxo de água, ocorrendo assim o refinamento capilar do concreto (DUART, 2008). Ou ainda, Pereira da Costa (2015) explica que a matriz com a cinza de casca de arroz apresenta ao concreto tortuosidades nos poros capilares, podendo, em idades mais avançadas, provocar desconexões entre os poros. Assim, acredita-se que, este ensaio ao ser realizado aos 28 dias, não possibilitou a formação do gel C-S-H secundário, o que poderia auxiliar na diminuição da absorção capilar.

A análise de variância (ANOVA), foi efetuada para os dados de capilaridade na idade de 72 horas e estão representados na Tabela 12, visando confirmar se há diferença entre os compósitos estudados.

Tabela 13 – Análise de variância para o ensaio de capilaridade na idade de 72 horas

Parâmetro	Variável	Valor-P	Significativo
72 horas	LI-REF vs. LI-MCCA	0,0529	Não
72 horas	LI-REF vs. LI-CCA	0,00471	<i>Sim</i>
72 horas	LI-CCA vs. LI-MCCA	0,01543	Não
72 horas	TODAS AS AMOSTRAS	0,002213	Sim

Fonte: Elaboração própria

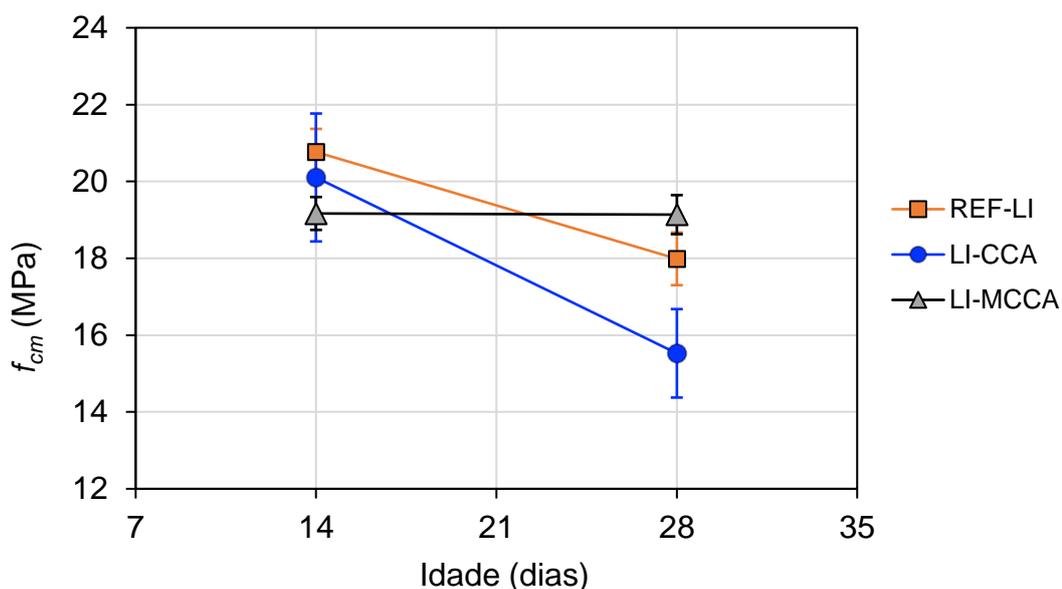
Analisando o gráfico da Figura 24 e os dados obtidos pela análise de variação ANOVA na Tabela 12, é possível notar que o tratamento superficial com lignosulfonato (LI-REF), quando comparado com o tratamento na matriz com substituição do cimento Portland por cinza de casca de arroz (LI-MCCA) não apresenta variação nos dados de absorção por capilaridade para a idade de analisada. Na sequência analisando o traço referência com o tratamento superficial com lignosulfonato e a casca de arroz (LI-REF vs. LI-CCA), existe uma variação entre os dados e, além disso, a curva obtida para o traço referência apresenta desvio padrão maior entre as amostras analisadas. A última comparação efetuada pela análise de variância ANOVA é efetuada entre o tratamento superficial com lignosulfonato e cinza de casca de arroz, e a substituição do cimento por cinza (LI-CCA vs. LI-MCCA), no qual nota-se uma conformidade entre eles, uma vez que não houve diferença significativa na absorção total ao final do

ensaio. Em suma, apesar de haver diferença entre todos os dados, nota-se que os dados obtidos para o traço LI-MCCA ficaram entre os demais. Verifica-se que, em relação ao tratamento com CCA na fibra, o tratamento com CCA na matriz apresentou-se mais eficaz na redução da absorção capilar do concreto.

4.2 Resistência à compressão axial

A resistência à compressão é uma das características mais importante na caracterização dos concretos, pois é a referência para classificação deste material. O gráfico da Figura 25, apresenta os resultados de compressão uniaxial para os diferentes traços, pelas idades de controle. Na sequência, a Tabela 13 apresenta as comparações entre as variáveis através da análise de variância (ANOVA), considerando uma confiança de 95%.

Figura 25 – Resistência média à compressão pela idade de ensaio.



Fonte: Elaboração própria

A partir do gráfico, nota-se que, para os traços REF-LI e LI-CCA, houve uma perda de resistência de 14 dias para 28 dias de 13,4% e 22,8%, respectivamente. Tal fato é um potencial indicativo de degradação da fibra no meio alcalino, mostrando que o tratamento na fibra com lignosulfonato (REF-LI) e lignosulfonato e CCA (LI-CCA) nas dosagens estudadas, não foram suficientes para manter a resistência do concreto. Por outro lado, verifica-se que não houve diminuição da resistência de 14 para 28 dias,

quando o tratamento foi realizado na matriz, com substituição parcial do cimento por CCA (LI-MCCA). Neste sentido, verifica-se o potencial de tratamento da fibra com lignosulfonato aliado ao uso de CCA como substituto do cimento. É importante ressaltar que seriam necessários mais ensaios para confirmar a não degradação da fibra para esta dosagem, como a análise em idades mais avançadas. A formação do gel C-S-H secundário pela reação da pozolona com o hidróxido de cálcio Ca(OH)_2 acontece de forma lenta. A quantidade de hidróxido de cálcio remanescente após essa formação, pode, ainda, ser responsável pela degradação da fibra, mesmo que parcial. Ensaios complementares para quantificar o teor de Ca(OH)_2 necessitariam ser avaliados.

Tabela 14 – Análise de estatística ANOVA para os ensaios de compressão uniaxial

Parâmetro	Variável	Valor-P	Significativo
14 dias	LI-REF vs. LI-MCCA	0,019925	<i>Sim</i>
14 dias	LI-REF vs. LI-CCA	0,551712	Não
14 dias	LI-CCA vs. LI-MCCA	0,398751	Não
28 dias	LI-REF vs. LI-MCCA	0,79994	Não
28 dias	LI-REF vs. LI-CCA	0,033583	<i>Sim</i>
28 dias	LI-CCA vs. LI-MCCA	0,007662	<i>Sim</i>
LI-REF	14 vs. 28	0,006189	<i>Sim</i>
LI+MCCA	14 vs. 28	0,941434	Não
LI+CCA	14 vs. 28	0,017307	<i>Sim</i>

Fonte: Elaboração própria

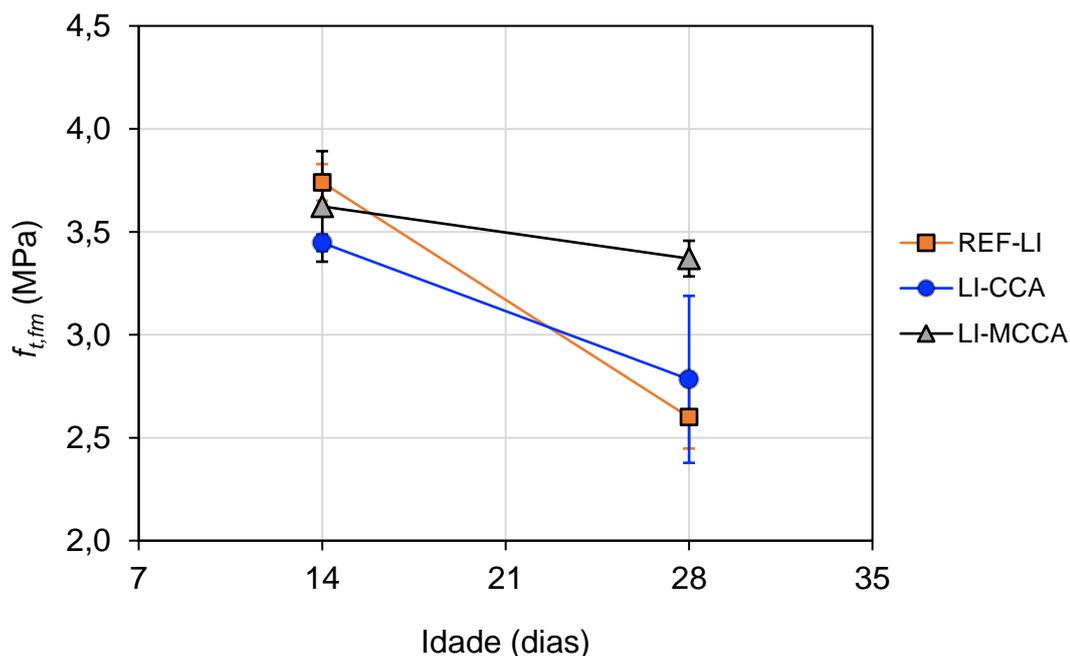
Na Tabela 13, foi efetuada, primeiramente, uma comparação entre compósitos, fixando-se as idades de controle. Como observado, no parâmetro de 14 dias, a única que apresentou relevância significativa foi a LI-REF vs. LI-MCCA. A redução no valor médio de resistência, de 20,77 MPa para 19,17 MPa, respectivamente, é esperada uma vez que houve a substituição parcial do cimento por CCA. Conforme mencionado anteriormente, a formação do gel C-S-H, responsável pela resistência mecânica do concreto, ocorre de forma diferente, pois inicialmente há menor quantidade de cimento disponível para sua formação rápida em idades iniciais. Por outro lado, aos 28 dias não houve variação significativa apenas comparando-se o traço referência (REF-LI) com o traço contendo CCA como tratamento na matriz (LI-MCCA). Isso ocorreu

porque não houve queda significativa na resistência para LI-MCCA de 14 para 28 dias, conforme mostra as três últimas comparações da Tabela 13 (fixando-se os compósitos e comparando as idades de controle).

4. Resistência à tração na flexão

A Figura 26 mostra os resultados médios de resistência à tração na flexão pela idade de ensaio (14 e 28 dias). Na sequência são apresentados, na Figura 27, as curvas de carga *versus* deslocamento obtidas para os corpos de prova ensaiados aos 28 dias. Os corpos de prova ensaiados aos 14 dias não foram instrumentados. Por fim, na Tabela 14 está contido as análises de variância (ANOVA) para os mesmos parâmetros de comparação.

Figura 26 – Resistência média à tração na flexão pela idade de ensaio.



Fonte: Elaboração própria

Da mesma forma que evidenciado no ensaio de compressão, houve uma queda da resistência dos compósitos de 14 para 28 dias de ensaio. Os resultados colaboram com a hipótese ter ocorrido degradação da fibra. Por outro lado, houve também uma pequena redução da resistência à tração na flexão para o compósito LI-MCCA, no entanto esta variação não foi significativa, como evidencia a Tabela 14. Os ensaios complementares para verificação da degradação das fibras em maiores idades,

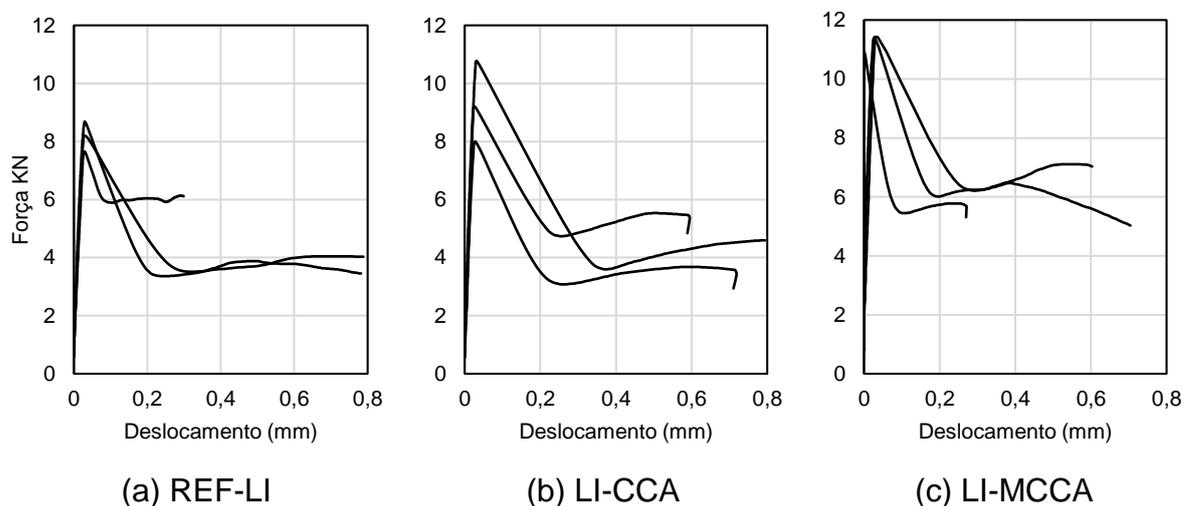
novamente se mostram necessários para confirmar a eficácia deste tratamento para a dosagem estudada.

Tabela 15 – Análise de variância ANOVA para o ensaio de tração na flexão de quatro pontos

Parâmetro	Variável	Valor-P	Significativo
14 dias	LI-REF vs. LI-MCCA	0,4197	Não
14 dias	LI-REF vs. LI-CCA	0,0046	<i>Sim</i>
14 dias	LI-CCA vs. LI-MCCA	0,3226	Não
28 dias	LI-REF vs. LI-MCCA	0,00082	<i>Sim</i>
28 dias	LI-REF vs. LI-CCA	0,255547	Não
28 dias	LI-CCA vs. LI-MCCA	0,0704	Não
LI-REF	14 vs. 28	0,000002	<i>Sim</i>
LI+MCCA	14 vs. 28	0,194717	Não
LI+CCA	14 vs. 28	0,047859	<i>Sim</i>

Fonte: Elaboração própria

Figura 27 – Curva carga (kN) versus deslocamento (mm) obtidas aos 28 dias.



Fonte: Elaboração própria

Em relação as demais comparações mostradas na Tabela 14, observa-se que a diferença significativa aos 14 dias foi apenas entre LI-REF e LI-CCA, enquanto que aos 28 dias, foi apenas entre LI-REF e LI-MCCA. Neste ensaio, houve uma maior queda no valor de resistência para os compósitos de 14 para 28 dias. O traço LI-REF

apresentou uma perda de resistência à tração de aproximadamente 35%, já o traço LI-CCA de 19,25%. Ao analisar os desvios padrões do gráfico da Figura 26, percebe-se que há uma grande variabilidade para os resultados de LI-CCA, o que explica a comparação não ser significativa em relação ao LI-REF e LI-MCCA.

As curvas apresentadas na Figura 27 evidenciam que todas as matrizes de concreto por conterem fibra apresentaram comportamento com maior tenacidade, além de maior capacidade de deformação após a abertura da primeira fissura. A fibra adicionada foi capaz de costurar a fissura, evitando a propagação de tensão na matriz frágil como relatado por Figueredo (2011), com um comportamento pseudo-dúctil. A tensão residual foi maior para o traço LI-MCCA, auxiliando, mais uma vez, na hipótese de melhor integridade da fibra para este tratamento comparado aos demais. A Tabela 15 mostra os valores mínimos, máximos e médios obtidos para os compósitos.

Tabela 16 – Comparação entre valores obtidos na curva carga *versus* deslocamento.

	REF-LI		LI-CCA		LI-MCCA	
	Deslocamento de ruptura (mm)	Força de ruptura (kN)	Deslocamento de ruptura (mm)	Força de ruptura (kN)	Deslocamento de ruptura (mm)	Força de ruptura (kN)
Mínimo	0,0283	8,18	0,0294	9,32	0,0221	11,23
Máximo	0,0275	7,65	0,0269	7,99	0,0025	10,836
Média	0,0300	8,69	0,0325	10,77	0,0362	11,42
DP	0,0014	0,42	0,0029	1,14	0,0175	0,28
CV (%)	4,81%	4,87%	8,81%	10,55%	79%	2,47%

Fonte: Elaboração própria

Admite-se, portanto, que a cinza de casca de arroz promove uma melhor preservação da fibra na matriz com valores de tensão de tração mais estáveis entre as idades para a dosagem estudada, devendo ser comprovado para idades mais avançadas. as matrizes analisadas sob esforço de tração apresentam melhor comportamento após a abertura de primeira fissura, aceitando ainda carregamentos e deformações mesmo com a falha da matriz frágil.

5.0 CONCLUSÃO E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

O presente estudo teve como objetivo avaliar a influência, em matrizes de concreto, do tratamento de fibras de sisal com lignosulfonato e comparar os resultados com o uso de cinza da casca de arroz (CCA) utilizadas juntamente na solução de tratamento das fibras ou como substituição parcial do cimento na matriz. Para tanto, foi avaliado primeiramente a capacidade de absorção de água das fibras tratadas, e verificação das modificações na superfície das fibras após o tratamento através de imagens microscópicas (MEV). Adicionalmente, foi avaliado a capacidade de tração direta das fibras, realizando um comparativo entre as fibras de sisal tratadas e em estado natural. No concreto, foi analisado o comportamento da matriz quanto a absorção de água por capilaridade, compressão uniaxial e tração na flexão.

Conclui-se que o tratamento superficial analisado na pesquisa não apresentou melhoras quanto a absorção de água da fibra. Tal fato pode ser associado à não impermeabilização dos filamentos da fibra pelo lignosulfonato, e que a capacidade higroscópica da fibra não foi modificada pelo tratamento. Ainda, a fibra tratada não apresentou ganho de resistência à tração direta, permanecendo com valores semelhante a fibra sem qualquer tratamento.

No ensaio de absorção de água por capilaridade, verificou-se que o uso de CCA tanto na solução quanto na matriz acarretou em aumento da absorção aos 28 dias. A presença de CCA na matriz, quando utilizada como substituição parcial ao cimento, tende a diminuir a absorção de água por capilaridade pelo refinamento dos poros e modificação da tortuosidade em idades mais avançadas. Neste caso, os caminhos de percolação de água entre a fibra e a matriz não estavam preenchidos suficientemente com novos produtos de hidratação aos 28 dias. Como sugestão para trabalhos futuros, recomenda-se a realização deste ensaio em diferentes idades (precoces e avançadas).

Nos ensaios mecânicos de compressão e tração na flexão, constatou-se que a fibra apresentou perda de resistência no meio alcalino da matriz de 14 dias para 28 dias, com exceção da mistura contendo substituição parcial do cimento por CCA (LI-MCCA). Assim, verifica-se que, para as quantidades estudadas, o tratamento apenas com lignosulfonato ou lignosulfonato mais CCA na solução, não foram suficientes para promover a proteção da fibra orgânica no concreto. Por outro lado, ao tratar as fibras com lignosulfonato e substituir parcialmente o cimento por CCA, não houve diminuição

da resistência de 14 para 28 dias, possivelmente devido ao consumo de Ca(OH)_2 pela pozolana. Conforme já mencionado, é necessário que sejam feitas análises em idades mais avançadas para comprovar que a quantidade de Ca(OH)_2 remanescente não seja suficiente para degradar o conteúdo de fibra presente no concreto. Portanto, recomenda-se tal estudo para trabalhos futuros.

O trabalho também possibilitou verificar que concreto reforçado com fibra de sisal conseguiu altos níveis de deformação e tenacidade após a formação da primeira fissura. As fibras promoveram a costura da matriz fissurada. Esse resultado é promissor, mostrando que a fibra de sisal pode ser utilizada como reforço, e que se pode obter melhores níveis de tenacidade e deformação se tratadas adequadamente.

Ainda como sugestão para trabalhos futuros, recomenda-se estudos com novas dosagens de fibra, lignosulfonato e CCA, no intuito de verificar uma combinação ótima para garantir que a fibra possa ser utilizada em matrizes de concreto e apresente um bom desempenho ao longo de sua vida útil.

Outra alternativa para trabalhos futuros seria produzir uma matriz com o CP-IV, afim de avaliar a compatibilidade deste cimento com a fibra natural de sisal com estudo em idades mais avançadas.

REFERÊNCIAS

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

_____. **NBR 5739: Concreto - Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos.** Rio de Janeiro, 2018.

_____. **NBR NM 45 - Agregados - Determinação da massa unitária e do volume de vazios.** ABNT, Rio de Janeiro, 2006.

_____. **NBR NM 52 -Determinação da massa específica e massa específica aparente.** ABNT, Rio de Janeiro, 2009

_____. **NBR 07211 - 2005 - Agregados para concreto – Epecificação.** ABNT, Rio de Janeiro, 2005.

_____. **NBR 17054: Agregados - Determinação da composição granulométrica - Método de ensaio.** ABNT, Rio de Janeiro, 2022.

.

_____. **NBR 9779: Argamassa e concreto endurecidos Absorção de Água por Capilaridade.** Rio de Janeiro, 2013.

ANSELL, M.P.; MWAIKAMBO, L.Y. The structure of cotton and other plant fibres. **Handbook of Textile Fibre Structure**, p. 62–94, 2009.

BENTUR, Arnon; MINDESS, Sidney. **Fibre reinforced cementitious composites.** Crc Press, pág. 31-95, Chapter 3: “Fibre-cement interactions: stress transfer, bond and pull-out”,2006. New York: Elsevier Science Publishers.

CARDOSO, Camila Vargas. **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 Unipampa.edu.br, 2017.

CARDOSO, Camila Vargas. **Avaliação das propriedades mecânicas e termomecânicas em compósitos cerâmicos refratários utilizando cinza de casca de arroz e lodo de estação de tratamento de água.** Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação Stricto Sensu em Engenharia da Universidade Federal do Pampa, 2022.

CALLISTER JR, W. D. JR. **Materials Science and Engineering - Introduction.** 2ª Edição, Cap 17, pág.358-371, New York: Jonh Wiley and Sons, INC., 2003

CASTOLDI, R. **Propriedades mecânicas e durabilidade de concretos reforçados com fibras de polipropileno e sisal.** Tese de mestrado (Mestre em Engenharia Civil) PUC-Rio Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2018.

DUART, Marcelo Adriano. **Estudo da microestrutura do concreto com adição de cinza de casca de arroz residual sem beneficiamento.** Dissertação do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (UFSM - Universidade Federal de Santa Maria), Santa Maria, 2008.

PASA, Vanessa Fatima. **Análise do comportamento de estruturas de concreto reforçado com fibras de aço via método dos elementos finitos.** Dissertação (Programa de Pós-Graduação Engenharia Civil) Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Escola de Engenharia, Porto Alegre 2007.

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

FIGUEIREDO, A.D. **Concreto: ciência e tecnologia**, pág. 1194-1225, Capítulo 37: "Concreto com fibras.", 2005. São Paulo: Instituto Brasileiro do Concreto, 2005.

FIGUEIREDO, A. Concreto com Fibras. In: ISAIA, G. C. **Concreto: Ciência e Tecnologia.** São Paulo: IBRACON, 2011. pp. 1328-1365.

FERREIRA, S.R.; LIMA, P.R.L.; SILVA, F.A.; et al. **Influência de ciclos molhagem-secagem em fibras de sisal sobre a aderência com matrizes de cimento Portland.** Matéria (Rio de Janeiro), v. 17, n. 2, p. 1024–1034, 2012.

JOSEPH, K.; MEDEIROS, E.S.; CARVALHO, L.H. **Compósitos de matriz poliéster reforçados por fibras curtas de sisal.** Polímeros, v. 9, n. 4, p. 136–141, 1999.

LIMA, P. R. L.; TOLEDO FILHO, R. D.; CORRESPONDENTE, Membro. **DETERMINAÇÃO DA TENSÃO DE ADERÊNCIA FIBRA-MATRIZ EM COMPÓSITOS À BASE DE CIMENTO REFORÇADOS COM FIBRA DE SISAL.** BRASIL NOCMAT, 2006.

NORONHA, Thaynon Brendon Pinto; SANTOS, Francisco Klebson Gomes dos; LEITE, Ricardo Henrique de Lima; et al. **Comportamento Mecânico de Argamassas de Cimento Reforçadas com Fibras de Sisal Tratadas com Hidróxido de Sódio.** **Revista de Ciências Exatas e Tecnologia**, v. 15, n. 15, p. 51–56, 2021.

PEREIRA, C.L.; SAVASTANO, H.; PAYÁ, J.; et al. **Use of highly reactive rice husk ash in the production of cement matrix reinforced with green coconut fiber.** Industrial Crops and Products, v. 49, p. 88–96, 2013.

PEREIRA DA COSTA, F. B. **Análise da durabilidade de compósitos cimentícios de elevada capacidade de deformação reforçados com fibras.** Dissertação (Programa de Pós-Graduação Engenharia Civil), Universidade Federal do Rio Grande do Sul Ufrgs.br, 2015.

QUEIROGA, V.P.; SILVA, O.R.R.F.; MEDEIROS, J.C.; *et al.* **SISAL (Agave sisalana, Perrine) TECNOLOGIAS DE PLANTIO E UTILIZAÇÃO.** 1ª Edição, Capítulos I e II, pág. 01-205, Campina Grande: AREPB, 2021.

SANTOS, Felipe M.R. dos; SOUZA, Thiago F. de; BARQUETE, Danilo M.; *et al.* **Comparative analysis of the sisal and piassava fibers as reinforcements in lightweight cementitious composites with EVA waste.** *Construction and Building Materials*, v. 128, p. 315–323, 2016.

SEDAN, D.; PAGNOUX, C.; SMITH, A.; *et al.* Mechanical properties of hemp fibre reinforced cement: Influence of the fibre/matrix interaction. **Journal of the European Ceramic Society**, v. 28, n. 1, p. 183–192, 2008.

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.; MOBASHER, R.B.; TOLEDO FILHO, D. Cracking mechanisms in durable sisal fiber reinforced cement composites. **Cement and Concrete Composites**, v. 31, n. 10, p. 721–730, 2009.

SPINACÉ, Márcia A. S.; JANEIRO, Lea G.; BERNARDINO, Filippe C.; *et al.* **Poliolefinas reforçadas com fibras vegetais curtas: sisal x curauá.** *Polímeros*, v. 21, n. 3, p. 168–174, 2011.

GUALBERTO, Suéllen Lopes. **Tratamento de fibras de sisal com lignosulfonato para aprimoramento das propriedades dos compósitos de fibrocimento.** 2020. 88 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2020.

TOLEDO FILHO, Romildo Dias; SILVA, Flávio de Andrade; FAIRBAIRN, E.M.R.; *et al.* **Durability of compression molded sisal fiber reinforced mortar laminates.** *Construction and Building Materials*, v. 23, n. 6, p. 2409–2420, 2009.

TOLENTINO, E.; CAMPOS, L.A.; OLIVEIRA, F.C. **COMPORTAMENTO MECÂNICO DE ARGAMASSAS DE CIMENTO PORTLAND FABRICADAS COM A ADIÇÃO DE FIBRAS DE SISAL MODIFICADAS POR ACETILIZAÇÃO**, p. 3014-3021. In: *72nd ABM Annual Congress*, São Paulo, 2017.

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

VENTURA, A.M.F.M. Os Compósitos e a sua aplicação na Reabilitação de Estruturas metálicas. SCIELO. **Ciência e Tecnologia dos Materiais**. v.21 n.3-4 Lisboa, julho, 2009.

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